

ФГБОУ ВО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«СТАНКИН»

ИНСТИТУТ БИОФИЗИКИ КЛЕТКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК –  
ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЦЕНТР «ПУЩИНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ –  
ФИЦ ПНЦБИ РАН (ПУЩИНО)

ФГУ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ  
МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
(ИПМ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН)

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ БИОЛОГИИ РАН –  
ФИЛИАЛ ИПМ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН (ПУЩИНО)

ФГБОУ ВО «МУРМАНСКИЙ АРКТИЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
CENTRO DE MATEMATICA COMPUTACIONAL E ESTOCASTICA INSTITUTO  
SUPERIOR TECNICO, LISBON (PORTUGAL)

*СЕДЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ*

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ**

*The Seventh International Scientific Conference (MNPS-2023)*

## **THE MODELING OF NONLINEAR PROCESSES AND SYSTEMS**

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ  
CONFERENCE PROCEEDINGS**

**Москва**

**Moscow**

**2024**

УДК 519.6

**Моделирование нелинейных процессов и систем.** Материалы  
седьмой международной конференции.- М.: Янус – К, 2024 - 344 с.

ISBN 978-5-8037-0943-5

В сборник включены материалы участников седьмой международной научной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем», проходившей 20–23 декабря 2024 года в Федеральном Государственном Бюджетном Образовательном Учреждении Высшего Образования «Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН».

© Коллектив авторов, 2024

ISBN 978-5-8037-0943-5

### **The conference goals and objectives:**

- Scientists consolidation, working in various fundamental scientific fields;
- Attraction of the young scientists;
- Organization of discussions and seminars on natural sciences modern problems;
- Discussion of the methodological problems and trends in the modern science;
- Discussion of the prospects and the results of the mathematical modeling methods applying to the biosystems and nanosystems;
- Discussion of the ecology and economy mathematical modeling concepts;
- Discussion problems of natural science and mathematics

### **Conference Topics:**

The conference covers following aspects

- ❖ Methods of mathematical modeling and their applications
- ❖ Nonlinear transport models
- ❖ Interaction of electromagnetic field with nonlinear systems
- ❖ Problems of modern ecology (including the Arctic region)
- ❖ Problems of industrial and natural aerosols spreading over water basins
- ❖ Mathematical models in economics
- ❖ Clusters and nanosystems theoretical and experimental research
- ❖ Molecular and biomolecular systems, Bionanocomplexes
- ❖ Neurosystems modelling
- ❖ Modeling of the information – active systems
- ❖ Synergistic aspects of modern science
- ❖ Numerical methods
- ❖ Difference equations
- ❖ Physical kinetic models
- ❖ Wave processes (including hydrodynamics)
- ❖ Real analysis
- ❖ Management in physical, technical, economic systems
- ❖ Artificial intelligence machine learning and computer vision modeling intelligent systems
- ❖ Managing of the technologies processes and smart manufacturing modeling of physical – chemical and mechanical properties of materials
- ❖ Mathematical models of high-precision processes of the materials handing

## **INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE**

B.N. Chetverushkin (Russia), A.S. Sigov (Russia), V.D. Lakhno (Russia), G.Yu. Riznichenko (Russia), A.K. Chernyshyov (Russia), M.V. Yakobovsky (Russia), V.V. Komarov (Russia), V.V. Vedenyapin (Russia), V.V. Sokolov (Russia), S.D. Traitak (Russia), I.V. Puzynin (Russia), L.V. Pletnyev (Russia), N.N. Karabutov (Russia), A.I. Lobanov (Russia), T.A. Sushkevich (Russia), A.A. Namgaladze (Russia), M.A. Knyazeva (Russia), V.L. Malyshev (Byelorussia), H. Haken (Germany), Sandra Pinelas (Portugal, Academia Militar), D. Gramotnev (Australia), S. Stevic (Serbia), I. Agranovski (Australia)

## **INTERNATIONAL PROGRAM COMMITTEE**

G. Gramotnev (Australia), P. Lima (Portugal), N. B. Aleksic (Serbia), A. Arinstein (Israel), N.N. Kholshchevnikova, I.M. Koval', E.R. Shukin, L.Yu. Vasil'eva, A.V. Shapovalov, O.V. Solyakov, L.V. Yakushevich, I.V. Krivenko, A.M. Sergeev, O.V. Zolotov, G.G. Gogoberidze, T.V. Ryjkova (Russia).

## **LOCAL ORGANIZING COMMITTEE**

D.Yu. Kolodyajnyi – *co-chairman*, L.A. Uvarova – *co-chairman*, A.B. Nadykto – *co-chairman*, V.A. Zagainov, Yu.V. Eliseeva, P.M. Pivkin, E.Yu. Romanova, M.A. Smirnova, O.A. Kazakov, T.V. Kazarova, O.B. Nadykto, E. M. Krasikova - *scientific secretary*, O.V. Stikhova - *scientific secretary*, V.G. Kirichenko, A.V. Kunitsina, N.A. Korobov – *scientific secretary*.

# USING STOCHASTIC DYNAMIC EQUATIONS IN NEURAL NETWORKS TO DESCRIBE THE BEHAVIOR OF NEURONS IN THE ABSENCE OF ACTIVE POTENTIAL

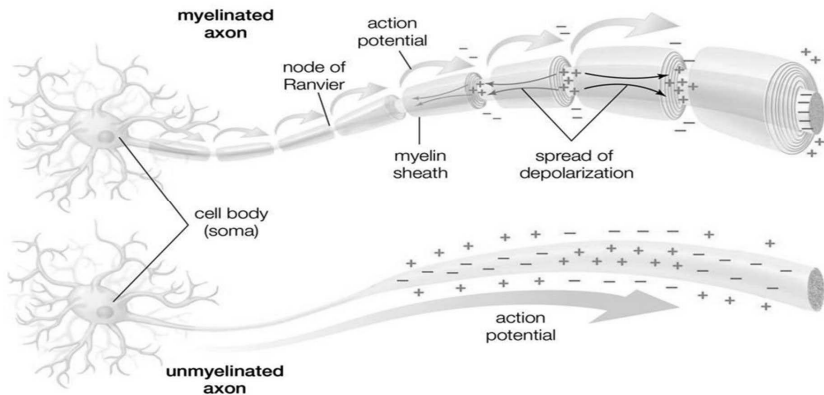
S.T. Belyakin

Department of General Physics, Physics Faculty, Lomonosov MSU, Moscow, Russia

119991, Academician Khokhlov Street, 1(2)

Tel.: (+7 495)939-51-56, e-mail: [sergeybelyakin@yandex.ru](mailto:sergeybelyakin@yandex.ru)

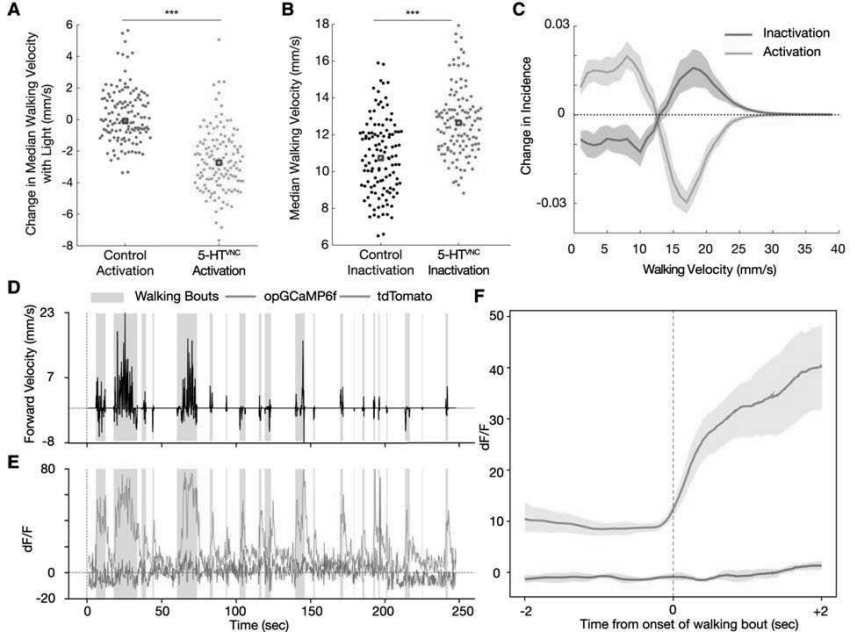
In this work, we use a dynamic stochastic model for active neural networks with a passive potential. Based on this model, it is supposed to study the state of the network. The term neural networks refers to the networks of neurons in the mammalian brain. Neurons are its main units of computation. In the brain, they are connected together in a network to process data. This can be a very complex task, and so the dynamics of neural networks in the mammalian brain in response to external stimuli can be quite complex. The inputs and outputs of each neuron change as a function of time, in the form of so-called spike chains, but the network itself also changes. We learn and improve our data processing capabilities by establishing reconnections between neurons [1–3]. The training set contains a list of input data sets along with a list of corresponding target values that encode the properties of the input data that the network needs to learn. To solve such associative problems, artificial neural networks can work well-when new data sets are governed by the same principles that gave rise to the training data [4].



**Fig. 1.** Schematic representation of a neuron. Dendrites receive input signals in the form of electrical signals through synapses. The signals are processed in the cell body of the neuron. The output signal is transmitted from the body of the nerve cell to other neurons via the axon.

Fig.1 shows a more schematic view of the neuron. The information is processed from left to right. On the left are the dendrites that receive the signals and connect to the cell body of the neuron, where the signal is processed. The right part of the picture shows the axon

through which the output is directed to the dendrites of other neurons. The information is transmitted as an electrical signal. The information is transmitted as an electrical signal. Fig.2 shows an example of the time series of the electric potential of a pyramidal neuron [5]. The time series consists of an intermittent series of electric potential jumps. Periods of rest without spikes occur when the neuron is inactive, and during periods rich in spikes, the neuron is active. Fig.2E (purple) Temporary portraits of the system (1).



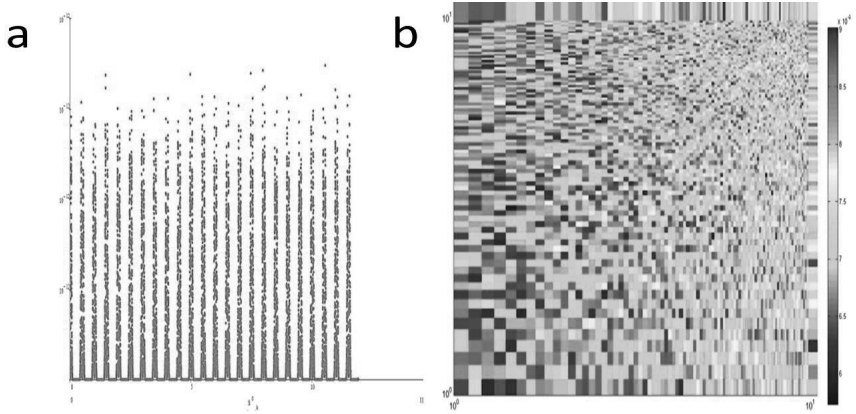
**Fig. 2.** Shows an example of the time series of the electric potential of a pyramidal neuron. The time series consists of an intermittent series of electric potential jumps.

The mathematical stochastic dynamic model in the absence of an active potential is represented by the equation (1) [6,7].

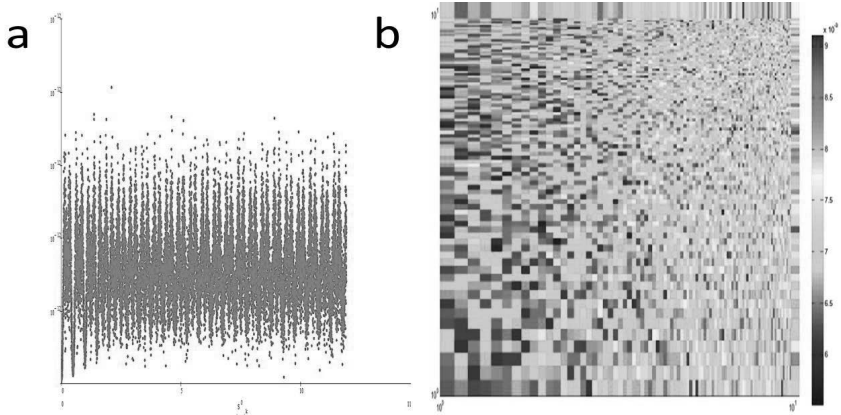
$$\begin{aligned}
 \dot{y}_1 &= a + b \sin \omega y_4, \\
 \dot{y}_2 &= \frac{\varepsilon}{1 + \exp(y_4)}, \\
 \dot{y}_3 &= \frac{\varepsilon}{1 + \exp(-y_2)}, \\
 \dot{y}_4 &= y_3 + \sin \omega y_1 + K \sin \tau \omega t.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Time portraits of system (1) are shown in Fig.3(a) passive with positive chirality (Fig.2(E) purple):  $a = 1.5$ ,  $b = 0.5$ ,  $\varepsilon = 1.0$ ,  $\omega = 2\pi$ ,  $K = 1.0$ ,  $\tau = 2.0$ . Fig.3(b) Lyapunov exponent:  $K = 1.0 - 10$ ,  $\tau = 0.1 - 1.0$ . Fig.4(a) passive with positive chirality (Fig.2(E)

purple):  $a = 1.5$ ,  $b = 0.5$ ,  $\varepsilon = 0.1$ ,  $\omega = 2\pi$ ,  $K = 1.0$ ,  $\tau = 2.0$ . Fig.4(b) Lyapunov exponent:  $K = 1.0 - 10$ ,  $\tau = 0.1 - 1.0$ .



**Fig. 3.** Time portraits of system (1) are shown in Fig.3(a) passive with positive chirality (Fig. 2(E) purple)  $a = 1.5$ ,  $b = 0.5$ ,  $\varepsilon = 1.0$ ,  $\omega = 2\pi$ ,  $K = 1.0$ ,  $\tau = 2.0$ . Fig.3(b) Lyapunov exponent:  $K = 1.0 - 10$ ,  $\tau = 0.1 - 1.0$ .



**Fig. 4.** Time portraits of system (1) are shown in Fig.4(a) passive with positive chirality (Fig. 2(E) purple)  $a = 1.5$ ,  $b = 0.5$ ,  $\varepsilon = 0.1$ ,  $\omega = 2\pi$ ,  $K = 1.0$ ,  $\tau = 2.0$ . Fig.4(b) Lyapunov exponent:  $K = 1.0 - 10$ ,  $\tau = 0.1 - 1.0$ .

The active states of the system are shown in Fig.3 and their active potentials are shown in Fig. 1 (top in yellow) and Fig.2(E) in green. The active states of the system with a passive potential are shown in Fig. 4, and their states are shown in Fig.1 (top in yellow) and Fig.2E in purple (Creates continuous chaotic modulation). System of equations (1) can be used for active systems with positive chirality when the system is in a passive potential.

### References:

1. Belyakin S.T. "Journal of Nanosciences Research & Reports". US: v.2, №4, 2020, P.1– 4.
2. Belyakin S.T. "Global Journal of Nanomedicine". US: v.13, №3, 2020, P.001 – 009.
3. Belyakin S.T. "Advances in Nanoscience and Nanotechnology journal". v.3, №3, 2019, P.1– 6.
4. Lecun, A., Bengio, Y., Hinton, G., // Deep learning. "Nature". US: v.521, 2015, P.463.
5. Gabbiani, F., Metzner,W. "Journal of Experimental Biology". US: v.202, №10, 1999, P.1267.
6. Belyakin S.T. "Earth & Environmental Science Research & Reviews", v.3, №3, 2020, P.160– 164.
7. Polyak. M.D. " System analysis and management. Computer science. Telecommunications. Control." Scientific and technical bulletin of SPbSPU, v.1, 2013, P.33– 38.



# RECONSTRUCTION OF HUMAN ANTHROPOMETRIC PARAMETERS ON VIDEO FOOTAGE USING NEURAL NETWORKS AND RANDOM FOREST ALGORITHM

**E.E. Fomina**

Tver State Technical University, Tver, Russia

170026, Tver, emb. Af. Nikitin, 22

e-mail: [f-elena2008@yandex.ru](mailto:f-elena2008@yandex.ru)

Video surveillance systems are an integral part of the security system of any facility. The materials of video archives are used in investigative measures to restore the course of events and solve the problem of identity identification [1]. Due to the features of the video material, it is not always possible to carry out portrait identification [2-3]. So, for example, in the case of shooting from a remote distance or from an unsuccessful angle, portrait identification is difficult. In this case, the only feature that characterizes the individual in the video is the gait.

Currently, the gait identification technique is not used in the daily practice of forensic experts and is used only when the gait has a pronounced personality. The task of developing such a methodology is urgent.

Gait is characterized by a large set of dynamic features, but the problem is to choose an identifiably significant set of features that can be unambiguously fixed regardless of the shooting angle.

In this paper, the step cycle was studied as one of the important parameters that allow for the identification of an individual by the signs of gait [4]. The research material was video recordings of volunteers walking on an electric treadmill with automatic speed control. As a result, a database was formed, including video recordings of 224 people walking. In the database, along with video recordings, information about the body weight, height, age and gender of the individual was recorded.

To digitize the information, a «Software package for calculating the characteristics of the step cycle» was developed [5]. Before digitization, each record was decomposed into a video sequence, from which a cyclogram corresponding to four steps was extracted. Four steps are necessary to study the features of walking with support on the left and right legs. The cyclogram was loaded into the software package, the lengths of the periods of double support and transfer in seconds and percentages of the step cycle, the length of the step cycle and the walking frequency were calculated automatically. As a result, a database of anthropometric parameters and digital characteristics of the steps of 224 people was formed [6].

The collected information was used to develop algorithms and software packages for restoring a person's height, weight and gender on video and walking speed [7, 8]. The recovery algorithms are based on the use of the Random Forest method and a direct propagation neural network. The obtained quality indicators on the test sample allow using these software packages to solve identification problems.

### References:

1. Smakhtin E.V., Shcherbich S.V. The use of video recording systems in the disclosure and investigation of crimes // *Altai Legal Bulletin*. 2017. № 1 (17). PP. 137-141.
2. Kustov A.M., Kokorev R.A. Problems of using video recordings in the investigation of crimes against the person // *Proceedings of the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2018. № 1 (45). PP. 73-77.
3. Petrov S.M. Forensic examination of gait // *Theory and practice of forensic examination*. 2022. Vol. 17. No. 3. PP. 26-39.
4. Skvortsov D.V. Clinical analysis of movements. Gait analysis. Ivanovo: Publishing house of SPC «Stimul», 1996. 344 p.
5. Fomina E.E., Leonov S.V., Kosukhina O.I. Software package for calculating the characteristics of the step cycle. Certificate of state registration of the computer program No. 2022682014 dated 17.11.2022.
6. Kosukhina O.I., Fomina E.E., Leonov S.V. Database of characteristics of the step cycle. Certificate of state registration of the database No. 2022623085 dated 24.11.2022.
7. Fomina E.E., Zybin D.G. A program for determining human anthropometric parameters based on the characteristics of the step cycle using the random forest algorithm. Certificate of state registration of the computer program No. 2023661287 dated 30.05.2023.
8. Fomina E.E., Zybin D.G. A program for determining anthropometric parameters of a person based on the characteristics of a step cycle using a neural network. Certificate of state registration of the computer program No. 2023660729 dated 24.05.2023.

# **SOCIODYNAMIC APPROACH IN INFORMATION SECURITY MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS**

## **Karlova Tatyana Vladimirovna**

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia  
127055, Vadkovskii lane, 3a  
Tel.: +7 (903)776-90-78, e-mail: karlova-t@yandex.ru

## **Bekmeshov Alexander Yuryevich**

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia  
127055, Vadkovskii lane, 3a  
Tel.: +7 (926)582-34-35, e-mail: b-a-y-555@yandex.ru

## **Mikhailova Marianna Valeryevna**

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia  
127055, Vadkovskii lane, 3a  
Tel.: +7 (903)192-55-65, e-mail: [mari.mikhaylova@list.ru](mailto:mari.mikhaylova@list.ru)

## **Tikhomirov Alexey Eduardovich**

Institute for Design-Technological Informatics RAS  
г. Москва, Россия  
127055, Vadkovskii Lane, 18, building 1A  
Tel.: +7 (962)959-99-96, e-mail: alexey.tikhomirov@list.ru

Requirements for the design and manufacture of competitive products in modern conditions of import substitution pose the following urgent task for domestic enterprises:

- production of high-tech products while ensuring intellectual information security based on an automated management system for integration and optimization of technological and human resources.

A common characteristic of the development of the science of an integrated quality management system is the path from passive control to complex automation of the formation and evaluation of information about the quality of a competitive technological production environment. Depending on the pace of technological progress, the relevant methods must be modified and improved, and, consequently, there is a danger of leakage of author's information. In this regard, one of the important approaches is sociodynamic analysis in the management of automated technological processes in the context of information security.

The expert assessment of the choice of the most invariant method of information processing consists in the developed options for integrated quality assurance of the technological production environment. The problem lies in the construction of additional structures to the main management system, the influence of which on the dynamics of management processes is partially or completely compensated.

The solution to the problem can be achieved by taking into account the construction of additional functional modules using the Bellman optimality principle in the development of information security and personnel communications.

The structure of assessing the degree of security in the design of components of new types of import-substituting samples (Fig. 1) includes the creation of a prototype and

information protection subsystems, which are divided into an automated project management system and a sociodynamic system of human intellectual resources.

The electronic environment includes subsystems of databases, models of representation of functioning schemes and methods of identification and optimization. The sociodynamic environment contains subsystems of knowledge bases, models of representation of expert knowledge and methods of processing expert information. It is necessary to assess the degree of intellectual security using the Bellman method.

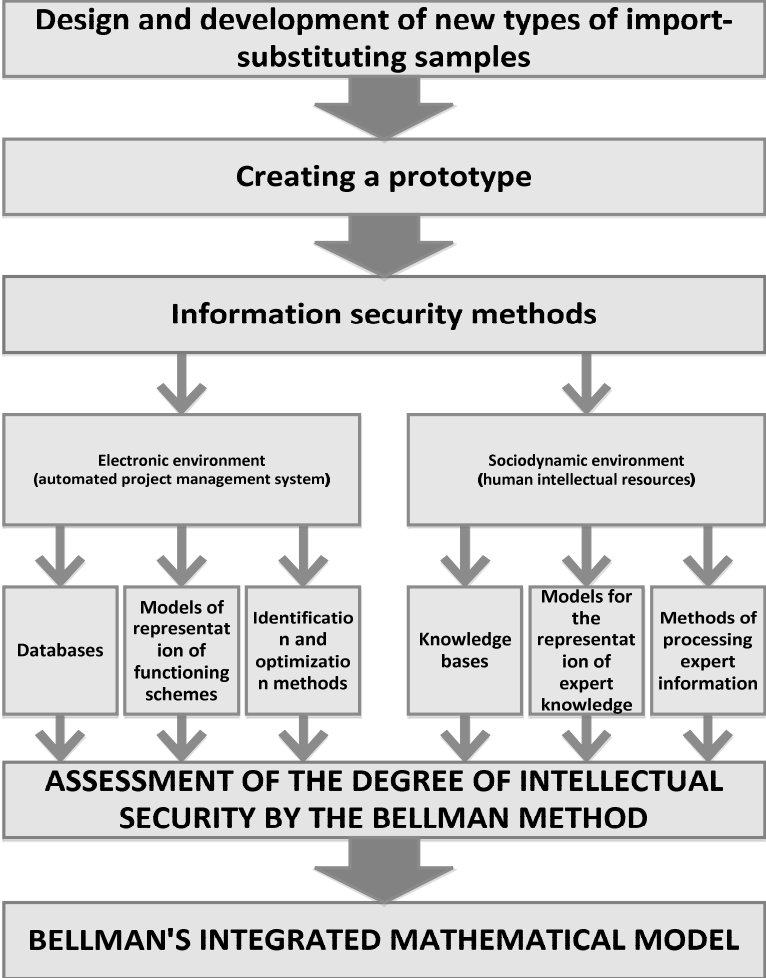


Fig. 1 – The structure of the assessment of the degree of protection in the design of components of new types of import-substituting samples

Richard Bellman's method is used to comprehensively solve the dynamic programming problem, which allows optimizing heterogeneous types of objects that consist of dependent and influencing subsystems. The principle optimizes solutions in multifactorial nonlinear problems.

Let's say the technological process (TP) for the production of components of import-substituting TexPr parts consists of  $N$  technological operations:

$$TexPr = \{Op_i \mid i = 1, \dots, N\} \quad (1)$$

Each of the technological operations  $Op_i$  allows the choice of one of the  $M_i$  permissible technological modes (TR)  $TR_{i, \xi, k}$  for processing products produced on one of certain types of equipment,  $\xi_{ik} \in 1, \dots, |\xi|$  – the equipment code from the directory:

$$Op_i = \{TR_{i, \xi, k} \mid k = 1, \dots, M_i\}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

TP operations  $Op_i, \quad i = 1, \dots, N$  (1) are performed sequentially.

At the same time, the entire cost of technological modes includes the cost of the resources used.

Determining the optimal combination of technological modes of the production process, including the cost of time and the minimum degree of risk of loss of intellectual resource, can be achieved using the integrated mathematical Bellman model, which minimizes the cost of ensuring the security of the information system.

#### References:

1. Tatyana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov, Natalia M. Kuznetsova. Protection the Data Banks in State Critical Information Infrastructure Organizations / Proceedings of the 2019 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), Sochy, Russia // Proceedings Edited by S. Shaposhnikov, St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2019, ISBN 978 1 7281 2594 7
2. Kuznetsova N. M., Karlova T. V., Bekmeshov A. Yu. Classification of computer attacks on automated systems of industrial enterprises Periodic scientific and practical journal "Quality. Innovation. Education " – No. 4 (162) July August, 2019. – Moscow: FSUE Izvestia Publishing House, UD PRF, 2019. – pp. 54-59. ISSN: 1999-513X. DOI: 10.31145/1999-513x-2019-4-54-59
3. Khorev P. B. Hardware and software protection of information: textbook. the manual / P. B. Khorev. - 2nd ed., ispr. and add. - M.: FORUM: INFA-m, 2019. 352s. – (Higher education) ISBN 978 5 00091 709 1 (FORUM)
4. Kuznetsova N.M., Karlova T. V. Basic principles of protection of automated systems of large industrial enterprises from complex cyber-attacks Scientific and technical journal "Bulletin of the Bryansk State Technical University" No.4 (57) 2017 // Publishing house of the Bryansk State Technical University, 2017, pp. 84-89.doi: 10.12737/Issue\_5a02f9f7150658. 06648590
5. Novikov, F. A. Discrete mathematics for programmers: teacher. - 2nd ed. - St. Petersburg: St. Petersburg, 2007. – 368 p.
6. Chernorutsky, I. G. Decision-making methods: teacher. - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005. – 416 p.
7. Borchik, E. M. Method of controlling the production process based on the Bellman principle of optimality / E. M. Borchik, A. I. Yakimov // Materials, equipment and resource-saving technologies: materials of the international scientific.- Technical conference : At 2 o'clock; editorial board: I. S. Sazonov (Chief editor) [et al.]; Mogilev, April 18-19, 2013 – Mogilev: Byelor.- Russian University, 2013. – part 1. - pp. 193-194.

# MODELING THE LEVEL OF SECURITY OF ENTERPRISE INFORMATION RESOURCES USING THE MONTE CARLO METHOD

Nataliya Mikhailovna Kuznetsova

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia  
127055, Vadkovskii lane, 3a

Tel.: +7 (903)581-80-15, e-mail: knm87@mail.ru

According to research [1], modern industrial enterprises are faced with the problem of countering the implementation of Advanced Persistent Threats (APT). The main features of these attacks are targeted, long-term, and difficult to detect. Another difference between APT and other attacks is its «two-phase» nature: APT consists of preparation and «collapse» stages.

Using the modeling of automated protection systems' effectiveness [2], models of the spread of viruses (as objects) [3], as well as using enterprises digital twin models [4] by means of the Monte Carlo method [4, 5] it is possible to determine the level of security of information resources of an industrial enterprise.

Figure 1 shows a scheme of the process of modeling the level of security of information resources of an industrial enterprise.

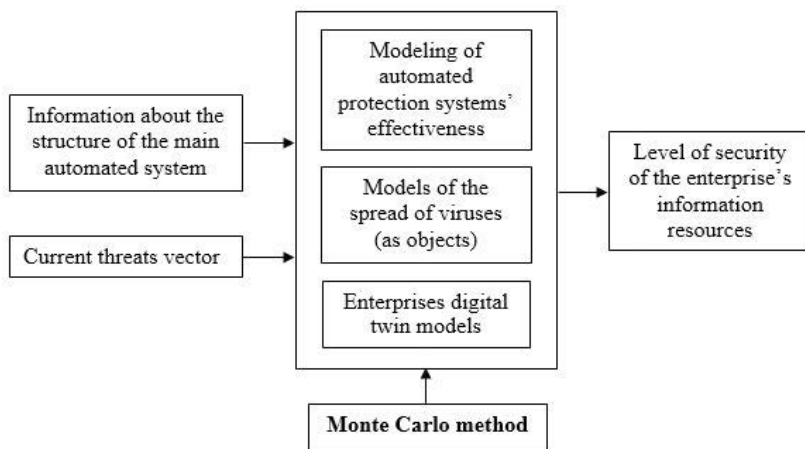


Figure 1 – Scheme of the process of modeling the level of security of information resources of an industrial enterprise

According to Figure 1, the input data are:

- information about the structure and resources of the main automated system of the enterprise (as objects of protection);
- current threats vector.

The main modeling mechanism is the Monte Carlo method.

The output data is the level of security of the enterprise's information resources.

The recommendations presented in the article for modeling the level of security of an enterprise's information resources by means of the Monte Carlo method would make it possible to timely identify attempts to implement APT-class attacks, as well as make management decisions to prevent them.

#### References:

1. Nataliya M. Kuznetsova, Tatiana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov Method of Timely Prevention from Advanced Persistent Threats on the Enterprise Automated Systems // 2022 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)
2. Kuznetsova N.M., Karlova T.V., Bekmeshov A.Yu., Sheptunov A.S. Application of Mathematical Modelling Methods for Evaluate the Efficiency of Automated Systems for the Protection of Intellectual Resources of Industrial Enterprises // The modelling of nonlinear processes and systems // The 6 International Science Conference (MNPS-2022). Conference proceedings / Под редакцией Л.А. Уваровой
3. Kuznetsova N.M., Karlova T.V., Bekmeshov A.Y. Automated Modeling of the Spread of Infectious Diseases Among the Population of a Metropolis Using Monte Carlo Method Taking into Account the Aspects of Information Security // Quality. Innovation. Education. – 2020. – № 5 (169). – PP. 96–102. ISSN: 1999-513X
4. Kuznetsova N.M., Karlova T.V. Application of Digital Twin Technology for Modelling of Information Security Level of Industrial Plant // EPJ Web of Conferences Volume 248 (2021), V International Conference «Modeling of Nonlinear Processes and Systems» (MNPS-2020) Moscow, Russia Published online: 26 April 2021 id.02007 <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124802007>
5. Kuznetsova N.M. Solving the Inverse Problem Using Monte Carlo Method // Materials of the student scientific and practice conference «Automation and Information Technologies» (AIT-2008)». – M.:MSUT «STANKIN», 2008. – 103 p.

# DESCRIPTION OF MOTION OF THE LOW-AMPLITUDE WAVE PACKET IN A WEAKLY NONLINEAR DISCRETE MEDIUM IN THE FRAMEWORKS OF THE ENERGY DYNAMICS

S.D. Liazhkov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia  
195251, Polytechnicheskaya str., 29

<sup>2</sup>Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

199178, Bol'shoy pr. 61, V.O.

Tel.: (+7 931)2254835, e-mail: sergeiliazhkov@gmail.com

**Abstract:** We describe motion of the low-amplitude modulated wave packet by using the analogy with description of motion of an absolutely rigid body in the frameworks of the classical mechanics. We present asymptotic assess for the stationary value of velocity of the energy center.

**Keywords:** nonlinear discrete medium, energy dynamics, nonlinear Schroedinger equation, velocity of the energy center.

Energy transfer by nonlinear waves plays a crucial role in a variety of applications, such as plasma (see, e.g., [1]), Josephson junctions (see, e.g., [2]), deep water (see, e.g., [3]), nonlinear circuits (see, e.g., [4]), reacting systems (see, e.g., [5]) et cetera. In particular, energy transfer in nonlinear lattices is of interest in connection with development of devices allowing heat propagation control, e.g., thermal diodes and rectifiers [6]. In nonlinear lattices, heat carries (phonons, intrinsic localized modes, solitons) interact with themselves, what causes distortion of the heat transport regime at the nanoscale, at which the interactions are absent (i.e. ballistic heat transport, see, e.g. [7]). On the one hand, analytical description of the interactions may be performed in the frameworks of the kinetic theory, based on the quasiparticle approach, namely, considering interaction of the quasiparticles itself. Although, the kinetic approach allows to solve problems, unsolvable by the lattice dynamics, it may inadequately describe evolutionary processes, e.g., caused by influence of dispersion or defects or by thermal expansion. Latter fact motivates us to use the approach, based on the energy dynamics [8], namely, description of energy transfer in the same manner as the matter transfer (initially, for motion of one wave packet).

Consider a discrete medium, dynamical equations of which have the form

$$m\ddot{u}_n = c(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) + \alpha((u_{n+1} - u_n)^2 - (u_n - u_{n-1})^2) - c_0u_n - c_1u_n^3, \quad n \in Z, \quad (1)$$

Where  $u_n$  is the displacement of  $n$ -th particle;  $m$  is the particle mass;  $c$  and  $\alpha$  are respectively the linear and nonlinear force constants, corresponding to the interaction potential;  $c_0$  and  $c_1$  are respectively the linear and nonlinear force constants, corresponding to the on-site potential.



To solve Eq. (1), we use approach proposed in [9]. We seek solution of Eq. (1) in the form

$$u_n = \sigma(A_{1,n}(t)e^{i\theta_n} + c.c.) + \sigma^2(A_{2,n}(t)e^{2i\theta_n} + c.c.) + O(\sigma^3), \theta_n = kna - \omega t, \omega = \sqrt{\frac{c_0}{m} + 4\frac{c}{m}\sin^2\frac{ka}{2}}, 0 < \sigma \ll 1, \quad (2)$$

where  $k$  is the wave number ( $ka \in (0; \pi)$ );  $\omega$  is the dispersion relation, corresponding to the pass-band. The function  $A_{\dots,n}$  is assumed to be slowly changing in time, namely  $A_{\dots,n} = A(\xi, t_1)$ ,  $t_1 = \sigma^2 t$ ,  $\xi = \sigma(na - v_g t)$ , where  $v_g = \frac{d\omega}{dk}$  is the group velocity. Mathematical justification of the aforesaid approach is given in [10]. Substituting (2) to (1) with transformations yields the following equation for the envelope of wave packet

$$i\partial_{t_1} A_{1,n} + P\partial_{\xi}^2 A_{1,n} + Q|A_{1,n}|^2 A_{1,n} = 0, \quad P = \frac{v_s^2 \cos(ka) - v_g^2}{2\omega}, \quad (3)$$

$$Q = -\frac{1}{2m\omega} \left( 3c_1 + \frac{128\alpha^2 \sin^4 \frac{ka}{2} \sin^2(ka)}{6c + 3c_0 - 8c \cos(ka) + 2c \cos(2ka)} \right)$$

where  $v_s$  is the sound velocity. The Eq. (3) is the nonlinear Schroedinger equation, which admits a solution with the soliton envelope. Since we seek the solution in a form of wave packet, we consider the case  $PQ > 0$  only. Therefore, the particular solution of Eq. (3) is

$$A_{1,n} = \frac{R_0 \exp\left(i\left(\sqrt{\frac{QR_0^2 + 2q_2}{2P}}\xi - q_2 t_1\right)\right)}{\cosh\left(\sqrt{\frac{Q}{2P}}R_0\left(\xi - \sqrt{2P(QR_0^2 + 2q_2)}t_1\right)\right)}, \quad (4)$$

where  $R_0$  is the amplitude of wave packet;  $q_2$  is a free parameter. Putting  $q_2 = 0$ , we write the final solution for the particle displacement with accuracy of order of  $O(\sigma^2)$  as

$$u_n = U(na) \cos(\tilde{k}na - \tilde{\omega}t) + O(\sigma^2), \quad U(na) = \frac{2\sigma R_0}{\cosh\left(\sigma R_0 \sqrt{\frac{Q}{2P}}(na - \tilde{v}_g t)\right)}, \quad (5)$$

where  $\tilde{k} = k + \sigma R_0 \sqrt{\frac{Q}{2P}}$  is referred to as an effective wave number;  $\tilde{v}_g = v_g + \sigma R_0 \sqrt{2PQ}$  is referred to as an effective group velocity;  $\tilde{\omega} = \omega + \sigma R_0 v_g \sqrt{\frac{Q}{2P}}$  is referred to as an effective dispersion relation.

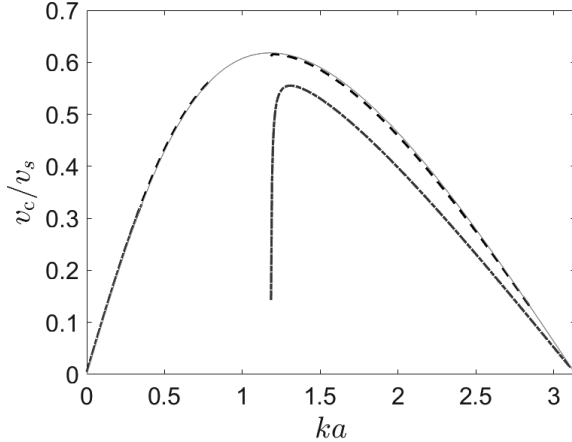
Following [8], we write the following equations for evolution of the energy center:

$$E\dot{v}_c = h, \quad E\ddot{v}_c = \Phi, \quad (6)$$

where  $E$  is the total energy of the chain (sum of local energies, determined by the first integrals of Eq.(1));  $v_c$  is the velocity of the energy center;  $h$  is the total energy flux of the chain;  $\Phi$  is an effective net force, causing acceleration of the wave packet. Indeed, there is analogy with the classical mechanics: (total energy = mass, total energy flux = momentum, effective net force = net force). Calculation of the aforesaid quantities and averaging (with respect to time) of them over  $2\pi/\tilde{\omega}$  yields

$$\langle E \rangle v_c = \langle h \rangle, \quad v_c = \frac{2v_s \sqrt{c/m} \tilde{\omega} \sin(\tilde{k}a)}{\tilde{\omega}^2 + (c_0/m) + 4(c/m) \sin^2 \frac{\tilde{k}a}{2}}, \quad \langle \Phi \rangle = 0. \quad (7)$$

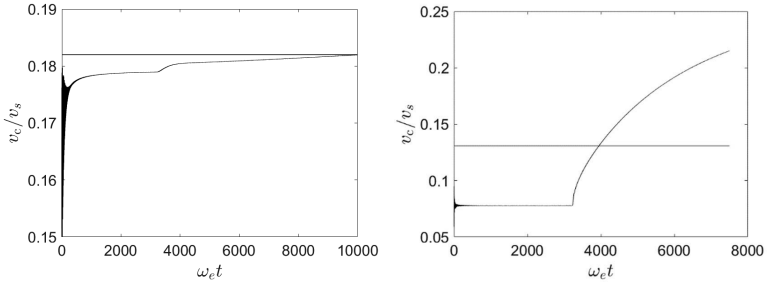
Dependence of  $v_c$  is shown in Fig. 1.



**Fig. 1.** Dependence of velocity of the energy center on wave number for  $c_0 = c$ ;  $c_1 R_0^2 / c = -1/6$ ;  $\sigma = 0.01$ ;  $\alpha R_0 / c = -10$  (blue line),  $\alpha R_0 / c = -1$  (black dashed line). The red line corresponds to the  $c_1 R_0^2 / c = \alpha R_0 / c = 0$ .

To check the result (Eq.(7)), we perform numerical calculation of  $v_c$  using Eq. (6) through numerical integration of Eq.(1) in the dimensionless form with initial conditions, determined by Eq. (5) (with respect to  $u_n$ ,  $\dot{u}_n$ ), by using the forth-order symplectic integrator [11,12]. The comparison revealed consistency of the estimate (7) for velocity of the energy center with the results of numerical simulation at large times (see Fig.2, left) except for the

case of  $ka \approx 1.18 \pm 0.01$  (see Fig.2, right), where the effective characteristics are near the discontinuity for the reason of absence of dispersion ( $P = 0$ ). For this case, solution may be refined, apparently, by consideration of the arbitrary initial condition for the wave packet (e.g. gauss-type) and analysis of its dynamics in terms of the inverse scattering transform.



**Fig. 2.** Comparison of asymptotic estimate (Eq.(7)) with results of numerical simulations for  $c_1 R_0^2/c = -1/6$ ;  $\alpha R_0/c = -10$ ;  $ka = 2.5$ ,  $\sigma = 0.02$  (left);  $ka = 1.18$ ,  $\sigma = 0.005$  (right).

### Conclusion:

A motion of the low-amplitude modulated wave packet has been described in terms of the energy dynamics. The velocity of the energy center is obtained by using the asymptotic solution for the wave packet, envelope of which obeys the particular solution of the nonlinear Schroedinger equation. In future work, we plan to describe interaction of two- and three-wave packets in the frameworks of the energy dynamics. The latter problem is assumed to be solved by virtue of analysis of system of the coupled nonlinear Schroedinger equations and the solution is expected to be easier for interpretation than one obtained by the kinetic theory.

The work was supported by the Foundation for the Advancement of Theoretical Physics and Mathematics “BASIS”.

### References:

1. Chaudhary R., Tsintsadze N. L., Shukla P. K. Nonlinear propagation of intense electromagnetic waves in a hot electron–positron plasma //Journal of plasma physics. – 2010. – T. 76. – №. 6. – C. 875-886.
2. Ancilotto F., Salasnich L., Toigo F. dc Josephson effect with Fermi gases in the Bose-Einstein regime //Physical Review A. – 2009. – T. 79. – №. 3. – C. 033627.
3. Cousins W., Sapsis T. P. Unsteady evolution of localized unidirectional deep-water wave groups //Physical Review E. – 2015. – T. 91. – №. 6. – C. 063204.
4. Halidou H. et al. Rational W-shape solitons on a nonlinear electrical transmission line with Josephson junction //Physics Letters A. – 2022. – T. 430. – C. 127951.
5. Othmer H. G. Nonlinear wave propagation in reacting systems //Journal of Mathematical Biology. – 1975. – T. 2. – №. 2. – C. 133-163.
6. Malik F. K., Fobelets K. A review of thermal rectification in solid-state devices //Journal of Semiconductors. – 2022. – T. 43. – №. 10. – C. 103101.

7. Podolskaya E. A., Krivtsov A. M., Kuzkin V. A. Discrete thermomechanics: From thermal echo to ballistic resonance (a review) //Mechanics and Control of Solids and Structures. – 2022. – C. 501-533.
8. Krivtsov A. M. Dynamics of matter and energy //ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. – 2023. – T. 103. – №. 4. – C. e202100496.
9. Remoissenet M. Low-amplitude breather and envelope solitons in quasi-one-dimensional physical models //Physical Review B. – 1986. – T. 33. – №. 4. – C. 2386.
10. Giannoulis J., Mielke A. Macroscopic pulse evolution for a nonlinear oscillator chain //PAMM: Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. – Berlin: WILEY-VCH Verlag, 2004. – T. 4. – №. 1. – C. 540-541.
11. Candy J., Rozmus W. A symplectic integration algorithm for separable Hamiltonian functions //Journal of Computational Physics. – 1991. – T. 92. – №. 1. – C. 230-256.
12. McLachlan R. I., Atela P. The accuracy of symplectic integrators //Nonlinearity. – 1992. – T. 5. – №. 2. – C. 541.

# ANALYTICAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE NEURAL FIELD EQUATION WITH DIFFUSION

**P.M. Lima**

CEMAT, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Portugal,  
plima@math.tecnico.ulisboa.pt

**N.V. Chemetov**

DCM-FFCLRP, University of S. Paulo, Ribeirão Preto, Brasil, nvchemetov@gmail.com

**D. Avitabile**

Vrije Universiteit Amsterdam, Holland, d.avitabile@vu.nl

We are concerned with the analytical and numerical solution of the following integro-differential equation:

$$\partial V(x, \xi, t) / \partial t = -\gamma V(x, \xi, t) + \nu \int_{\Omega} W(x, \xi, x', \xi') S(V(x', \cdot, t)) d\xi' dx' + G(x, \xi, t) \quad (1)$$

for  $(x, \xi, t) \in \Omega_T = \Omega \times [0, t_{max}]$ , where  $\Omega = T^n \times [0, L]$ ,

and  $T^n$  is the  $n$ -dimensional torus, being equivalent to the quotient space  $\left(\frac{\mathbb{R}}{2\pi\mathbb{Z}}\right)^n$ .

We search for a solution  $V$  of (1), being a periodic function on  $x$ , defined on whole  $\mathbb{R}^n$ , such that

$$V(x + 2\pi, \xi, t) = V(x, \xi, t), \forall x \in \mathbb{R}^n, \xi \in [0, L], t \in [0, t_{max}], \quad (2)$$

and identifying  $V$  with its restriction to the fundamental domain  $[0, 2\pi]^n$

We also assume that no current leaks away at the boundaries  $\xi = 0$  and  $\xi = L$ , which corresponds to the Neumann boundary conditions

$$\frac{\partial V(x, 0, t)}{\partial \xi} = \frac{\partial V(x, L, t)}{\partial \xi} = 0, \forall t \in [0, t_{max}]. \quad (3)$$

Moreover, we have the initial condition

$$V(x, \xi, 0) = V_0(x, \xi), \forall (x, \xi) \in \Omega. \quad (4)$$

In (1),  $\gamma$  and  $\nu$  are known physical positive constants, while  $W, S, G$  are given functions.

In the case  $\nu=0$  equation (1) is known as the neural field equation and is used since the years 70 of the last century to model the activity of interacting neurons in certain regions of the brain.

From the physical point of view, the introduction of the diffusion term is justified as taking into account the dendritic processing, which is discussed in [1]. In the cited paper, the authors have presented an efficient numerical algorithm for the approximation of the solution of (1) - (4). Here we develop an analytical study of the problem (1)-(4), focusing on how the solution of this problem depends on the parameter  $\nu$ .

Then we carry out some numerical experiments that illustrate the theoretical findings.

### **References:**

1. D. Avitabile, S. Coombes and P.M. Lima, Numerical investigation of a neural field model including dendritic processing, *Journal of Computational Dynamics*, 7 (2020), 270-290.

# STATISTICAL ESTIMATES OF THE AVERAGE NUMBER OF CLUSTER SITES ON UNIFORMLY WEIGHTED SQUARE LATTICES

P. V. Moskalev<sup>1,2</sup>, L. S. Onishchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State Technological University “STANKIN”, Moscow, Russia,  
127055, Vadkovsky lane, 1

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,  
394006, 20th Anniversary of October st., 84

E-mail: [moskaleff@mail.ru](mailto:moskaleff@mail.ru)

A significant part of statistical estimates of the characteristics of clusters on finite-size percolation lattices are related to the probability of formation of these clusters, which makes such estimates very sensitive not only to sample sizes, but also to lattice sizes. Approximations of such empirical relationships are often based on various sigmoid functions. For example, to approximate the relative frequency of formation of contracting (percolation) clusters from a sample  $\{w_i(p_i)\}$  of  $n$  points on finite-size lattices, logistic models can be used [1, 2]:

$$w_i = 1/(1 + \exp(-(p_i - p_c)/s)) + e_i, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

where  $p_c, s$  are shift and scale parameters of the model (1), the first of which is usually subject to estimation, and the latter is determined by the percolation lattice size. The logistic function  $w(p)$  is bounded and strictly monotonic, describing the asymptotic transition from the lower limit value to the upper one as the argument increases:

$$w(p \rightarrow -\infty) \rightarrow 0+ \quad \text{and} \quad w(p \rightarrow +\infty) \rightarrow 1-. \quad (2)$$

Note that when statistically estimating the parameters of functions of the form (1), only those points whose ordinates differ significantly from their limiting values (2) have information significance. In the absence of a priori estimates of the percolation threshold, this can increase the computational complexity of the problem and leads to a significant dependence of the errors in statistical estimates on the available computing resources.

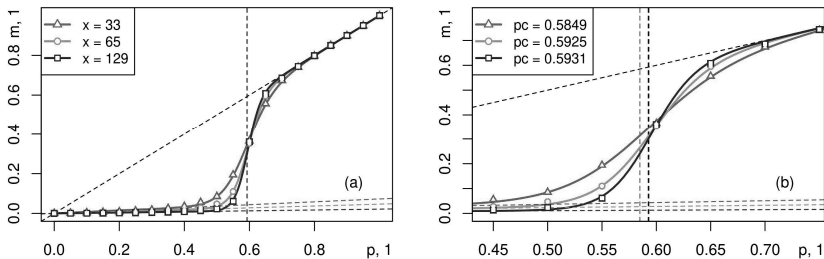
One of the possible ways to reduce the computational complexity of such a problem is to estimate the required characteristics from samples of quantities based on statistics not of the clusters as a whole, but of the percolation lattice sites included in the clusters. We will form estimation data based on the number of cluster sites with a sample size of  $N = 300$  implementations on uniformly weighted square lattices with linear sizes  $x = 33, 65, 129$  sites for a given grid of open site probabilities  $p = 0, 0.05, \dots, 1$ . The correlation fields of these samples are shown in Figure 1. The “triangle”, “circle” and “square” symbols correspond to samples built on percolation lattices of sizes  $x = 33, 65$ , and 129 sites.

It can be shown that all presented samples  $\{m_i(p_i)\}$  can be approximated by monotonic sigmoid functions describing the transition between the lower and upper slant asymptotes passing through the origin. This allows us to propose a generalized logistic model:

$$m_i = kp_i + (1 - k)p_i/(1 + \exp(-(p_i - p_c)/s)) + e_i, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

where  $k$  is a parameter that determines the angular coefficient of the lower slant asymptote;  $p_c, s$  are the shift and scale parameters of the model (3) that determine the position

of the inflection point and the radius of the neighborhood within which the second derivative of the approximating function (3) differs significantly from zero.



**Fig. 1.** Approximation (3) for the number of cluster sites  $m$  on uniformly weighted square lattices at  $x = 33, 65, 129$  sites vs. open site probabilities  $p = 0, 0.05, \dots, 1$

The slant dashed lines in Figure 1 correspond to: a) lower slant asymptotes of the form  $m = kp$ , approximating the behavior of model (3) at subcritical values of the probability of open sites  $p < p_c$ ; b) an upper slant asymptote of the form  $m = p$ , approximating the behavior of model (3) at supercritical values of the probability of open sites  $p > p_c$  and coincides on the interval  $(0, 1)$  with the cumulative distribution function of a uniformly distributed random variable  $s \sim \text{unif}(0, 1)$  weighing sites on the percolation lattice.

The vertical dashed line in Figure 1(a) corresponds to the value of the site percolation threshold on a square lattice with a unit von Neumann neighborhood  $p_c = 0.592746\dots$ , known from the literature [2]. The vertical dashed lines in Figure 1(b) correspond to statistical estimates of the shift parameter of models (3), found for samples of site clusters on lattices with different linear sizes: a)  $\mathbf{I}_{0.95}(p_{c1}) = (0.5849 \pm 0.0026)$  for  $x_1 = 33$  sites; b)  $\mathbf{I}_{0.95}(p_{c2}) = (0.5925 \pm 0.0017)$  for  $x_2 = 65$  sites; c)  $\mathbf{I}_{0.95}(p_{c3}) = (0.5931 \pm 0.0014)$  for  $x_3 = 129$  sites.

All results were obtained using the “*ssi20()*” function from the “*SPSL*” package released by the author for the R system under the GNU GPL-3 license [3]. To estimate the parameters of the regression model, the “*gsl\_nls()*” function from the “*gsl\_nls*” package, released under the GNU GPL-3 license for the R system, was used [4]. A summary of the results obtained when constructing approximation (3) for the number of cluster sites on the probability of open sites for square lattices with size  $x = 129$  sites is given in this listing:

```
> print(summary(f3))

Formula: w3 ~ k * pp + (1 - k) * pp/(1 + exp(-(pp - pc)/s))

Parameters:
  Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
k  0.0213085  0.0047065   4.527 0.000261 ***
pc 0.5930757  0.0006710 883.896 < 2e-16 ***
s  0.0201649  0.0006513 30.963 < 2e-16 ***

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```



Residual standard error: 0.004525 on 18 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 7

Achieved convergence tolerance: 5.236e-12

```
> print(confint(f3, parm="pc"))
```

```
2.5 % 97.5 %
```

```
pc 0.591666 0.5944853
```

When using only statistical indicators, the quality of the constructed approximation can be characterized as good. This can be seen by looking at the observed t-test values for the model parameter estimates, as well as the residual statistics for the predicted values.

Note, that the radius of the 0.95-confidence intervals decreases asymptotically with increasing the lattice size  $x$ . For example, the absolute error in estimating the shift parameter  $p_c$  of model (3) will not exceed  $\varepsilon \leq 0.001$  with a lattice size of at least  $x \geq 250$  sites, and the level  $\varepsilon \leq 0.0005$  will be achieved with a lattice size of at least  $x \geq 1000$  sites. This behavior suggests that the quality of model (3) can be improved by choosing functions that better approximate the latent features of the data obtained through computational experiments.

The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-21-00376).

#### References:

1. Moskalev P. V. Percolation Modeling of Porous Structures. – Moscow: URSS, 2018 [in Russian].
2. Newman M. E. J., Ziff R. M. // Phys. Rev. Lett., V. 85, 2000, P. 4104, DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.4104.
3. Moskalev P. V., SPSL: Site Percolation on Square Lattices. – CRAN, 2019, URL: <https://cran.r-project.org/package=SPSL>.
4. Chau J. gslnl: GSL Nonlinear Least-Squares Fitting. – CRAN, 2023. – URL: <https://cran.r-project.org/package=gslnl>.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF FLOW CHARACTERISTICS FOR POROUS TITANIUM SAMPLES

P. V. Moskalev<sup>1,2</sup>, V. F. Selivanov<sup>2</sup>, L. S. Onishchenko<sup>2</sup>, A. V. Netreba<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State Technological University “STANKIN”, Moscow, Russia,  
127055, Vadkovsky lane, 1

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,  
394006, 20th Anniversary of October st., 84

E-mail: moskaleff@mail.ru

The effectiveness of using porous materials strongly depends on the ability of design engineers to predict their properties, which, in turn, depend on the availability of data on the internal structure of the porous material samples used [1]. In one of the simplest cases, the internal volume of samples of porous materials consists of three parts: open, dead-end and closed pores, differing in the connectivity of the corresponding volume with the external surfaces of a given sample.

For these studies, we used samples of porous titanium obtained by pressing titanium powder and subsequent sintering at different densification of the samples. Sintering was carried out in a sealed metal container at an absolute temperature of about 1288 K and a residual pressure of about 0.1 Pa [2]. The main part of the work on characterizing the samples was carried out in the spring – autumn of 2023 at the Voronezh State Technical University. The total porosity of the samples was estimated by the gravimetric method from the difference in masses of solid and porous materials, and the effective porosity was estimated from the difference in masses of dry and saturated samples with distilled water. In this case, the total porosity of the samples  $\Pi_t$  varied in the range from 0.21 to 0.52, and the effective porosity  $\Pi_e$  varied in the range from 0.02 to 0.42 [3].

To estimate the pore size distribution, a comparative analysis of the empirical characteristics of air flow for dry samples  $\{Q_{0i}(p_i)\}$  (“circle” symbols in Figure 1(a)) and samples saturated with distilled water  $\{Q_{1i}(p_i)\}$  (“triangle” symbols in Figure 1(a)) is used [1]. Figure 1(a) shows examples of correlation fields and nonlinear approximations for the flow characteristics  $\{Q_{0i}(p_i)\}$  and  $\{Q_{1i}(p_i)\}$  of a sample with total porosity  $\Pi_t = 0.441$  and effective porosity  $\Pi_e = 0.394$ . To approximate the flow characteristics of a dry sample, we used a quadratic polynomial model with a zero free term:

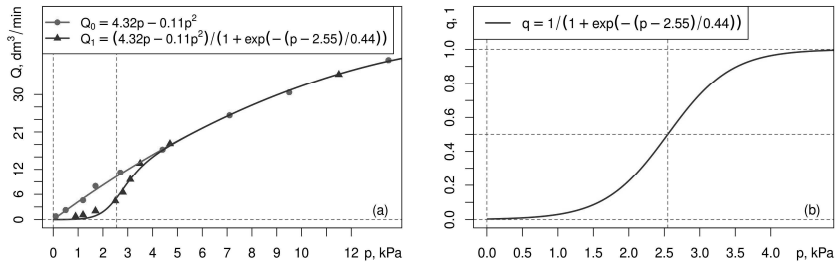
$$Q_{0i} = b_1 p_i - b_2 p_i^2 + e_i, \text{ для } i = 1, 2, \dots, n_0, \quad (1)$$

where  $Q_{0i}$  is the volumetric air flow through the dry sample,  $\text{dm}^3/\text{min}$ ;  $p_i$  is the differential pressure for the sample, kPa;  $n_0$  is the sample size obtained for the flow characteristic  $\{Q_{0i}(p_i)\}$ ;  $b_{1,2}$  is the components of the vector of model parameters (1), estimated by the least squares method using the sample  $\{Q_{0i}(p_i)\}$ . To approximate the flow characteristic of a sample saturated with distilled water  $\{Q_{1i}(p_i)\}$ , we used the product of polynomial (2) and the logistic function:

$$Q_{1i} = (b_1 p_i - b_2 p_i^2) / (1 + \exp(-(p_i - b_3)/b_4)) + e_i, \text{ для } i = 1, 2, \dots, n_1, \quad (2)$$

where  $Q_{1i}$  is the volumetric air flow through a sample saturated with distilled water,  $\text{dm}^3/\text{min}$ ;  $n_1$  is the sample size obtained for the flow characteristic  $\{Q_{1i}(p_i)\}$ ;  $b_{3,4}$  is the components of

the vector of model parameters (1), estimated by the nonlinear least squares method using the sample  $\{Q_{1i}(p_i)\}$ .



**Fig. 1.** Flow characteristics for the porous titanium sample under study: a) in absolute forms (1) and (2); b) in relative form (3)

If we consider the relationship between functions (2) and (1), we can obtain the integral flow characteristic of the sample  $q(p) = Q_1(p)/Q_0(p)$ , which describes the transition between functions (2) and (1) with an increase in differential pressure  $p$  by the sample:

$$q = 1/(1 + \exp(-(p - b_3)/b_4)). \quad (3)$$

An example of the integral flow characteristic of the porous titanium sample under study (3) is shown in Figure 1(b). It is easy to see that the shift parameters  $b_3 \approx 2.549$  for models (2) and (3) coincide, and the abscissa  $p = b_3$  corresponds to the maximum of the first derivative and the inflection point of the relative flow characteristic (3).

To transform equation (3) from differential pressures on the sample  $p$  to equivalent hydraulic pore radii  $r$ , we used the Young-Laplace equation [4]:

$$r = 2\sigma \cos(\theta)/p, \quad (4)$$

where  $\sigma = 0.0725$  N/m is the surface tension coefficient at the water-air interface;  $\theta = 72^\circ$  — contact angle at the water–titanium dioxide interface. Taking into account (4), the integral  $q(r)$  and differential  $dq(r)/dr$  dimensional characteristics (corresponding to the pore size distributions in the sample under study) will take the form:

$$q = 1 - 1/(1 + \exp(-(c_1/r - b_3)/b_4)); \quad (5)$$

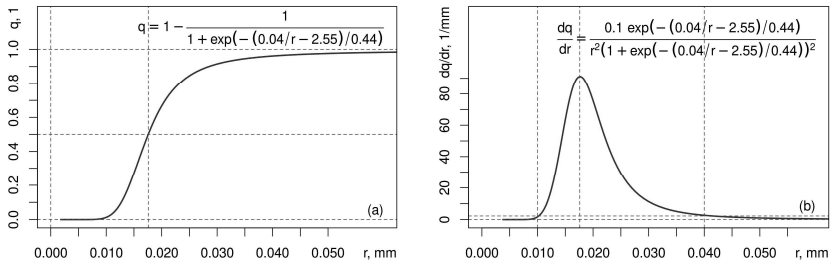
$$dq/dr = c_1 \exp(-(c_1/r - b_3)/b_4) / (b_4 r^2 [1 + \exp(-(c_1/r - b_3)/b_4)]^2), \quad (6)$$

where  $c_1 = 2\sigma \cos(\theta) \approx 0,0448$  N/m is the dimensional coefficient from the Young-Laplace equation.

Figure 2 shows examples of constructing integral (5) and differential (6) dimensional characteristics for the porous titanium sample under study. To statistically estimate the parameters of regression models, the “*gsl nls()*” function from the “*gsl nls*” package, released under the GNU GPL-3 license for the R system, was used [5]. A summary of the results obtained when constructing approximations (1) and (2) for the flow characteristics of the porous titanium sample under study is given in Listing 1.

**Listing 1.** Estimation of parameters of models (1) and (2) for the sample under study

```
> print(summary(fl1 <- lm(Q1 ~ 0 + p1 + I(p1^2))))
```



**Fig. 2.** Pore size distributions for the studied porous titanium sample: a) in integral form (5); b) in differential form (6)

Call:

lm(formula = Q1 ~ 0 + p1 + I(p1^2))

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.4849	-0.1028	0.1175	0.3440	0.9270

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
p1	4.320733	0.087290	49.50	3.60e-10 ***
I(p1^2)	-0.111491	0.007801	-14.29	1.95e-06 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.4833 on 7 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9995, Adjusted R-squared: 0.9994

F-statistic: 7521 on 2 and 7 DF, p-value: 2.17e-12

```
> b1 <- coef(f11)[1]
```

```
> b2 <- coef(f11)[2]
```

```
> print(summary(f12 <- gsl_nls(Q2 ~ (b1*p2 + b2*p2^2)/(1+exp(-(p2-b3)/b4)),
+ start=list(b3=1, b4=1))))
```

Formula: Q2 ~ (b1 \* p2 + b2 \* p2^2)/(1 + exp(-(p2 - b3)/b4))

Parameters:

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
----------	------------	---------	----------

b3 2.54861 0.09757 26.121 3.08e-08 \*\*\*

b4 0.44378 0.09700 4.575 0.00256 \*\*

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.82 on 7 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 18

Achieved convergence tolerance: 2.396e-12

Based on statistical indicators, the quality of the constructed approximations (1) and (2) can be characterized as good. Based on these approximations and shown in Figure 2(a), the integral characteristic (5) is an asymmetric sigmoid function with a “heavy tail” and an inflection point at the critical value of the hydraulic pore radius  $r_c \approx 0.0176$  mm. Accordingly, the differential characteristic (6) shown in Figure 2(b) is a bell-shaped curve with positive asymmetry and a global maximum at the same critical value of the hydraulic pore radius  $r = r_c$ . This asymmetry is clearly visible when constructing a 0.95-confidence interval for the hydraulic pore radii, shown by the horizontal and corresponding vertical dashed lines in Figure 2(b):

$$I_{0.95}(r) = (0.01, 0.04) = (0.0176 - 0.076, 0.0176 + 0.0224).$$

The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-21-00376).

#### References:

1. Plachenov T. G., Kolosentsev S. D. Porosimetry. – Leningrad: Chemistry, 1988 [in Russian].
2. Moskalev P. V., Selivanov V. F., Bokarev D. I. et al. // PREPRINTS.RU, 2023. – DOI: 10.24108/preprints-3112910 [in Russian].
3. Antsiferov V.N., Ustinov V.S., Olesov Yu.G. Sintered alloys based on titanium. – Moscow: Metallurgy, 1984 [in Russian].
4. Washburn E. // PNAS USA. – 1921. – Vol. 7. – P. 115. – DOI: 10.1073/pnas.7.4.115.
5. Chau J. gslnl: GSL Nonlinear Least-Squares Fitting. – CRAN, 2023. – URL: <https://cran.r-project.org/package=gslnl>.

# MODIFICATION OF THE PERCOLATION ALGORITHM BY CONSIDERING THE LIQUID-GAS PHASE TRANSITION

Phyo Wai Linn

MSTU “STANKIN”, Moscow, Russia

127055, Vadkovskii lane, 3a

Tel.: (+7 999)904-79-08, e-mail: [phyowailinnmipt@gmail.com](mailto:phyowailinnmipt@gmail.com)

The percolation algorithm, a fundamental tool in network theory and statistical physics, has found widespread application in various fields. This thesis explores the modification of the percolation algorithm to accommodate the intricate dynamics of the liquid-gas phase transition, a phenomenon critical in understanding diverse physical systems such as porous materials, biological tissues, and environmental processes.

Traditional percolation models primarily focus on binary states (occupied or unoccupied) without accounting for the dynamic transitions between liquid and gas phases. In this study integrates the renowned Hoshen-Kopelman algorithm to enhance the algorithm's accuracy and efficiency in capturing intricate phase transition dynamics within complex systems. The Hoshen-Kopelman algorithm, renowned for its efficiency in labeling clusters in percolation problems, offers a refined methodology for tracking the evolution of clusters during the liquid-gas phase transition. This research also endeavors to bridge this gap by proposing novel modifications to the existing percolation algorithm, introducing elements that account for the liquid-gas phase transition dynamics. Through the integration of statistical mechanics principles and computational simulations, the adapted percolation algorithm seeks to provide a more accurate representation of percolating structures in systems experiencing phase transitions. The effectiveness of the proposed modifications is evaluated with highlighting improvements in the prediction and characterization of percolating clusters within dynamic systems undergoing liquid-gas phase transitions. The modified percolation algorithm investigates critical phenomena associated with phase transitions.

In conclusion, the modified percolation algorithm, enriched by the Hoshen-Kopelman algorithm, provides a valuable tool for researchers and scientists seeking to model and analyze the intricate dynamics of materials undergoing liquid-gas phase transitions. The integration of these algorithms opens avenues for further research and applications in diverse scientific domains. The thesis explores the impact of the modified percolation algorithm in diverse applications, ranging from materials science to environmental engineering.

## References:

1. Uvarova L. A., Phyo Wai Lin., Simulating transfer processes in reaction-diffusion under nonlinear electromagnetic fields. -Samara: Bulletin of Samara State Technical University ISSN 1991-8615 (Print) ISSN 2310-7081 (Online), 2021. Volume 25, No. 4, P. 663-675.
2. Uvarova L. A., Phyo Wai Lin., Modeling of the “reaction – diffusion” transfer process in the nonlinear electromagnetic field. -Rhodes, Greece: Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics, 2022. Volume 2425, Issue 1 AIP Conf. Proc. 2425, 100003 (2022).
3. Uvarova L.A., Phyo Wai Lin, Krivenko I. V., Electromagnetic resonance and induced effects in dispersed systems. -Moscow: The journal "Perspectives of Science" ISSN 2077-6810, 2023. №10(169), P. 35-50.

## SEMICLASSICAL DYNAMICS OF QUASIPARTICLES IN THE NONLOCAL FISHER-KPP MODEL

A.V. Shapovalov<sup>1,2</sup>, A.E. Kulagin<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russia  
634050, Novosobornaya sq., 1

Tel.: (+7 3822)529843, e-mail: [shpv@mail.tsu.ru](mailto:shpv@mail.tsu.ru)

<sup>2</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia  
634050, Lenin ave., 40

<sup>3</sup> Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia  
634050, 30 Lenin av.

e-mail: [ack8@tpu.ru](mailto:ack8@tpu.ru)

<sup>4</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia  
634055, 1 acad. Zuev sq.

**Abstract:** We construct asymptotic solutions to the nonlocal Fisher-KPP equation using the formalism of the semiclassical approximation based on the Maslov complex germ method. The attractive feature of the solutions in this work is that their behavior as quasiparticles whose dynamics stems from the original FKPP equation.

**Keywords:** semiclassical asymptotics; Maslov method; nonlocal Fisher-KPP equation; weak diffusion; quasiparticles.

Models of a fairly wide class of nonlinear phenomena in physical and biological systems with long-range interaction are formulated mainly in terms of multidimensional integro-differential equations with variable coefficients responsible for the external impact on the system.

The mathematical complexity of such equations extremely limits the ability to study such model equations applying analytical methods. As a rule, the use of analytical approaches is associated with significant simplifications, which often leaves the most interesting aspects of the behavior of the systems under study out of sight.

To cope, perhaps partially, with this immanent obstacle, one can involve effective methods and approaches that have proven themselves in similar problems. In this context, the method of semiclassical asymptotics, based on the WKB-Maslov theory [1,2], proved to be fruitful for a special class of nonlinear evolution equations with nonlocal nonlinearity, which, in particular, include nonlocal generalizations of the nonlinear Schrödinger equation, the Gross-Pitaevskii equation in the theory of Bose-Einstein condensates [3], the generalized nonlocal version of the Fisher-Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov (FKPP) population equation [4] and some others.

In this work, we develop this formalism for the nonlocal FKPP equation that reads

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + a(x,t)u(x,t) - \kappa u(x,t) \int_{-\infty}^{\infty} b(x,y,t)u(y,t)dy.$$

The nonlocal FKPP equation describes one of possible mechanisms of pattern formation that relates to one of the important phenomenon arising in population biology.

Within such model, the coefficient  $a(x,t)$  stands for the reproduction rate,  $b(x,y,t)$  describes the competition losses, and  $u(x,t)$  is the population density. The study of these phenomena is carried out mainly by computer modeling, and known analytical methods provide only indirect information. In comparison, the semiclassical method has an advantage because it has the potential for modification allowing one to describe some aspects of pattern dynamics in terms of the properties of semiclassical asymptotics.

In this work, we extend the method described in detail in [4] to be able to construct quasiparticles-like asymptotic solutions in a special class of semiclassically concentrated functions for the one-dimensional nonlocal FKPP equation in the weak diffusion approximation [5].

In the framework of the approach developed, we deduce a dynamic system that describes the movement of quasiparticles, the interaction of which stems from nonlocal competitive losses included in the generalized FKPP equation under consideration.

The study is supported by Russian Science Foundation, project no. 23-71-01047, <https://rscf.ru/en/project/23-71-01047/>.

#### References:

1. Maslov V.P. The Complex WKB Method for Nonlinear Equations. I. Linear Theory. - Basel: Birkhauser Verlag, 1994.
2. Belov V.V., Dobrokhotov S.Yu. // Teor. Mat. Fiz., v. 92, 1992, P. 215-254 (English transl.: Theoret. and Math. Phys. v. 92, 1992, P.843-868).
3. Shapovalov A.V., Kulagin A.E., Trifonov A.Yu. // Symmetry, v. 12, article ID 201. 2020, 25 pp.
4. Shapovalov A.V.; Trifonov A.Yu. // Int. J. Geom. Methods Mod. Phys. (IJGMMP), v.15, 2018, article ID 1850102, 30 pp.
5. Kulagin A.E., Shapovalov A.V. // arXiv:2309.02129, 2023, 27 pp.



# ON APPLICATION OF DEEP DIFFUSION MODELS FOR MEDICAL IMAGE ANALYSIS

E. Yu. Shchetinin

Financial University under the Government of the Russian Federation,

Moscow, Russia

122044, Leningradsky pr., 49

Tel.: (+7 499)553-12-69, e-mail: EYShchetinin@fa.ru

Artificial intelligence, particularly machine learning and deep learning, has taken over the world [1,2]. Today, it is used in many fields - from manufacturing with vision-based defect inspection platforms, voice assistants to medical diagnostics (e.g. brain tumor detection). However, one important aspect to consider when using machine learning is data: how much (quality) data do you have? This is one of the challenges, especially in medical imaging. Since there is little annotated data, this makes it difficult to build good machine learning models [3,4]. Collecting and annotating more data is the first solution that may come to mind, but it is certainly not always feasible. Indeed, collecting, and annotating data in medical imaging is expensive, tedious, time-consuming, and requires specialists. This makes such an option less attractive. Fortunately, there are other solutions, in particular data augmentation. There are various methods of data augmentation ranging from classical to more advanced data sampling [5]. This paper reviews classical and some modern methods and conducts computer experiments on generative models based on diffusion process to solve classification, segmentation problems of biomedical images.

## References:

1. Castro, D.C., Walker, I. & Glocker, B. Causality matters in medical imaging. *Nat Commun* **11**, 3673 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17478-w>.
2. Chlap P, Min H, Vandenberg N, Dowling J, Holloway L, Haworth A. A review of medical image data augmentation techniques for deep learning applications. *J Med Imaging Radiat Oncol* 2021; 65: 545– 63.
3. Hazrat Ali, Shafaq Murad, Zubair Shah. Spot the fake lungs: Generating Synthetic Medical Images using Neural Diffusion Models, 2022; [arXiv:2211.00902](https://arxiv.org/abs/2211.00902).
4. Luke W. Sagers, James A. Diao, Matthew Groh, Pranav Rajpurkar, Adewole S. Adamson, Arjun K. Manrai. Improving dermatology classifiers across populations using images generated by large diffusion models, 2022. [arXiv:2211.13352](https://arxiv.org/abs/2211.13352).
5. Walter H. L. Pinaya, Petru-Daniel Tudosiu, Jessica Dafflon, Pedro F da Costa, Virginia Fernandez, Parashkev Nachev, Sebastien Ourselin, M. Jorge Cardoso. Brain Imaging Generation with Latent Diffusion Models, 2022. [arXiv:2209.07162](https://arxiv.org/abs/2209.07162).

# THE INDUSTRIAL COMPANIES FACTOR DERIVATIVES MATHEMATICAL CALCULATING MODEL

O.V. Stikhova

MSTU "STANKIN", Moscow, Russia

127055, Vadkovsky lane, 3a

Tel.: (+7 499)972-42-55, e-mail: [olgitast2011@mail.ru](mailto:olgitast2011@mail.ru)

The industrial companies factor derivatives mathematical calculating models remain relevant due to their multiparametric properties. It is natural that the real dependence structure of the financial differs from the Gaussian one in conditions of market fluctuations. The factor calculating models for the derivative credit instruments market in relation to industrial products manufacturers are considered in this paper [1]. The copula functions can be a useful and simple tool for implementing efficient algorithms and to simulate the financial asset returns distribution more realistically.

An important part in calibration models is to select and calibrate the most adequate copula function based on real financial data. The multiparametrical model based on generalized hyperbolic copula with generalized hyperbolic borders (CGH) takes into account the various mixed distribution and various boundary areas distributions, keeps desirable one-dimensional distribution GH properties [2]. The estimation functional characteristics required for solving the problems of forecasting the behavior of some collateralized debt obligations (CDO) and credit default swaps (CDS) problem are given in this paper [3]. The concept "derivative" of standard financial actives is allocated and the industry obligations secondary market control are considered. The credit derivatives tranches risk mathematical modeling task is solved. The copulas allow us to model the dependence structure independently from the marginal distributions. In this way we construct a multivariate distribution with different margins and the dependence structure given from a particular type of copula function [4].

A group of useful methods for calibrating and simulating copula functions is presented. The synthetic debt instruments portfolio is compiled according to the required parameters. In calibration models early defaults reduce the equity tranches payment required sums with high spreads, late defaults work absolutely opposite. For the basic portfolio CDO valuation the multiple-name default probability model is used [4].

$$V_{prot}(0) = E \left[ \begin{array}{l} T - \int_0^T r_u du \\ e^{-\int_0^T r_u du} N_T dL_S^{(K_1, K_2)} \\ 0 \end{array} \right]$$

In the work accumulated payments are accepted the premium part calculating based on CDS rates, the default time distribution is calculated, and the single-name default probability model is used to determine the underlying portfolio CDS price. The value of protection is determined by the size of the expected tranche default losses and the value of tranche premium part is calculated as the current price of all expected payments on spread, where an interval in payments is  $\Delta_i = T_i - T_{i-1}$ :

$$V_{prem}(0) = \sum_{i=1}^M E \left[ e^{-\int_0^{T_i} r_u du} s \Delta_i N_{tr} \frac{2 - L_{T_{i-1}}^{(K_1, K_2)} - L_{T_i}^{(K_1, K_2)}}{2} \right].$$

The single-name non-repayment credit risk estimation models help us to estimate the default opportunity and avoid it. With the portfolio losses  $x \in [0, 1]$  and the default threshold value  $K(t) = F_{GH}^{-1}(p(t))$ , where  $p(t)$  is neutral to risk default probability of each portfolio emitter, the portfolio loss distribution is:

$$F_{\infty}(t, x) = 1 - F_{GH_d} \left( \frac{1}{a} \left( K(t) - \sqrt{(1-a^2)} F_{GH_i}^{-1}(x) \right) \right)$$

For the tranche expected losses estimation in generalized hyperbolic copula multiparametrical model [5]:

$$EL_{(K_1, K_2)}(t) = \frac{1}{K_2 - K_1} \int_{K_1}^{K_2} (x - K_1) dF_{\infty}(t, x) + (1 - F_{\infty}(t, K_2)).$$

Calibration functions have been also implemented in the field of the integrated measurement of the different financial risks by modeling the dependence structure among the market, credit, and operational losses.

In this work the computing experiments and results verification on market products industrial sector companies credit default derivatives value are carried out both with the generated samples and with the real data. The calibration functions may be implemented to a portfolio of  $n$  financial assets traded on different stock markets such as the American, European and Asian ones.

The iTraxx indices of Europe, Asia, the Middle East and Africa with maturities of 3, 5, 7 and 10 years are considered, a new series is determined on the basis of liquidity every six months. The basic iTraxx Europe index includes 125 European names with the same weight in the effectiveness of the corresponding current iTraxx CDS contracts.

This paper calculation methods allow to simultaneously model the tail dependence and various distributions of boundary areas.

The copula functions are used for estimating the marginal contribution of each financial institution to the systemic risk, that is the instability of the global financial system. The implications in terms of macro-prudential policy and supervisory choices on financial and industrial companies are evident. The carried out calculation results, also for the various sphere of activity enterprises, have shown high efficiency [7].

## References:

1. Stikhova O.V. Mathematical modeling of the industrial companies credit derivatives default process / Vestnik MSTU «STANKIN». Scientific referenced journal. M.: MSTU «STANKIN», №4(23), 2012, pp.81-84
2. Stikhova O.V. Mathematical modeling double normal inverse gaussian copula and large portfolio approximation. «The Fundamental physics and mathematical problems and techno-technological systems modeling ». Annual collected scientific papers, 16. Ed.by. L.A.Uvarova. - M.: «Janus-K», 2014. pp. 97-102

3. Schetin E.Yu, Stikhova O.V. Mathematical modeling of default credit derivatives by copula models. / Scientific-practical and information-analytical collection "Financial analytics: problems and solutions", "Publishing House FINANCE AND CREDIT", 7(49)-2011, pp.16-25.
4. Stikhova O.V. «Mathematical Estimation Methods and Models for Industrial Companies» EPJ Web of Conferences 248, 03001 (2021) MNPS-2020 <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124803001>.
5. Stikhova O.V. Industrial Companies Mathematical Estimation Methods And Models. / The Fifth International Scientific Conference "The Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2020)". Ed.by. L.A.Uvarova.- M.: «Janus-K», 2021, pp.70-71.
6. Stikhova O.V. Mathematical Calibrating And Simulating Functions In Industrial Companies Application. / The International Scientific Conference "The Samarsky Readings (In Memory Of Academician A.A. Samarsky) (SR-2021)" and The Fifth International Scientific Conference "The Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2020)". Ed.by. L.A.Uvarova.- M.: «Janus-K», 2023, pp.60-62.

# A COMBINED EFFICIENT MODEL OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND EVOLUTIONARY ALGORITHM TO OVERCOME PROBLEMS ACCURATELY

Ivan V. Stepanyan<sup>1</sup> and Safa A. Hameed<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN) 4, M. Kharitonyevskiy Pereulok, 101990 Moscow, the Russian Federation.

e-mail: neurocomp.pro@gmail.com

<sup>1,2</sup>Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation.

Tel: (+7925)260-72-86, e-mail: 1042235121@rudn.ru

The use of a system that integrates artificial intelligence algorithms that are capable of recognition, analysis, diagnosis, automation, etc. is one of the essential criteria for the most significant areas of life. It demands very high output precision and efficiency. I put up a proposal that integrates two significant artificial intelligence algorithms to address this fundamental requirement in crucial ways. It is believed that the genetic algorithm is the most suitable for creating a hybrid system, but there is no doubt that the artificial neural network algorithm contributes significantly to providing solutions for the big questions in life.

Because the suggested method for the learning process required less time and allowed for the capability of comparing each iteration, the genetic algorithm was crucial in rapidly offering suitable answers at a high speed. A fitness function is used to assess the solution domain in a conventional genetic algorithm, together with a genetic representation of the solution domain. It can locate the optimization problem's global optimal solution, and the optimisation's outcome is independent of the starting points. The method can handle challenging optimisation issues and has a high degree of robustness.

The suggested system has recognition and classification capabilities. The artificial neural algorithm uses the genetic algorithm as a learning mechanism. Depending on the number of hidden layers an ANN proposes, the artificial neural network must be broken down into many ANNs to facilitate learning, when the genetic algorithm detects an unacceptable error rate, it modifies the necessary parameters. Then ANNs eventually be combined into one ANN algorithm to obtain the result. Because of the system, satisfactory results were obtained.

## References:

1. Mehra, Rishabh, et al. "An initiative to prevent Japanese encephalitis using genetic algorithm and artificial neural network." 2020 international conference on computational intelligence (ICCI). IEEE, 2020. DOI: 10.1109/ICCI51257.2020.9247744.
2. Zhang, Junjie, et al. "Hyper-parameter optimization by using the genetic algorithm for upper limb activities recognition based on neural networks." IEEE Sensors Journal 21.2 (2020): 1877-1884. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3018629.

# IRREDUCIBLE CARTESIAN TENSORS IN THEORY OF DIFFUSIVE INTERACTION: REVIEW AND NEW RESULTS

S.D. Traytak

N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics RAS,  
4 Kosygina St., 119991 Moscow, Russian Federation  
Tel.: (+7 495)939-71-01, e-mail: [sergtray@mail.ru](mailto:sergtray@mail.ru)

Motivated through various applications of the trapping diffusion-influenced reactions theory in physics, chemistry and biology, this paper deals with irreducible Cartesian tensors (ICT) technique within the scope of the generalized method of separation of variables (GMSV) [1, 2]. Presenting a survey from the basic concepts of the theory, we spotlight the distinctive features of our approach against known in literature similar techniques.

It is presently accepted that for the most part, chemical reactions in micro-heterogeneous liquid media are contact diffusion-influenced. The latter means that the rate of these reactions is determined significantly by the rate of encounter of reactants due to diffusion; that is, the reaction rate is not controlled by only the chemical requirement of overcoming an activation energy barrier. In addition, often the activation barrier appeared to be so small that we have to deal with fully diffusion-controlled reactions. Due to their high abundance, diffusion-influenced reactions play a decisive role for a wide and diversified range of applications often occurring in physics, chemistry, biology and nanotechnology. Examples include excitation quenching of donors by acceptors, heterogeneous catalysis, crystal defect annealing, crystal growth, Ostwald ripening, evaporating or burning of liquid droplets, particle coagulation, nutrient consumption by living cells and cell metabolism to name just a few.

To describe diffusion-influenced reactions theoretically often so-called Smoluchowski's trapping model is used, i.e., assuming that particles diffuse in a continuum medium containing immobile ensembles of absorbing sinks. We assume that arbitrary but finite number of inert obstacles and absorbing sinks are regularly or randomly distributed within a given region of surrounding medium. Clearly that Smoluchowski's theory does not account for the influence of neighboring sinks. Quite apparently the presence of other neighboring absorbing sinks decreases the local concentration of diffusing around Brownian particles, and so each sink captures less particles than it would a single isolated one. This, obviously, implies that many-sink effects should be incorporated into theoretical analysis. According to accepted terminology, many-sink effects are called the diffusive interaction. Corresponding mathematical problem is well-defined, however, the theoretical description of the diffusive interaction is mostly so complicated that solving of such problem analytically at least approximately is very difficult if it is even possible.

We shall investigate here micro-heterogeneous medium in which spherical obstacles including absorbing sinks, of different radii are distributed in a second distinct continuous phase. The dispersed obstacles assumed to be non-overlapping and impenetrable. In Fig. 1 we give a sketch for a typical configuration of obstacles under three kinds of boundary conditions: (a) Robin for partially reflecting sinks (gray spheres); (b) Dirichlet for fully absorbing sinks (black spheres) and (c) Neumann for fully reflecting obstacles (white spheres).

It has been shown explicitly that the diffusive interaction effects become the most profound in the steady state and it is this regime that will be studied in this paper. A number of different analytical approaches proposed to solve the posed problem for the steady state

were reviewed in our papers [3-5]. Note that the most complete list of the commonly used analytical and numerical methods to solve the stationary diffusion problems along with some comments was given there.

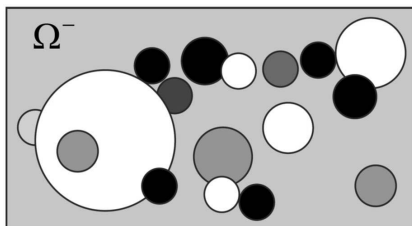


Fig. 1

Here, we consider a modification of the GMSV that goes back to Rayleigh's seminal paper of 1892 on the conductivity of heat and electricity in a medium comprising cylindrical or spherical sink systems. Although the GMSV by means of ICT seems to be fairly convenient at least for numerical calculations, however it still did not draw due proper attention to researchers. The present work extends our previous studies [1, 2] to the general case of the steady-state diffusion-influenced processes. We develop a detailed theory of the diffusive interaction effects by means of the ICT technique within the framework of microscopic Smoluchowski's trapping theory. It turns out that solution in terms of the ICT elucidates rather subtle mathematical facets of the multipole method and, what is more important, it significantly simplifies the calculation of the diffusion field and corresponding reaction rates. The main purpose of this presentation is twofold. First, we intend to pose rigorously the mathematical problem for the most general case of boundary conditions, describing the small particles diffusion and absorption in a medium with dense arrays of both spherical inert obstacles and reactive sinks. Secondly, providing the overall view onto the GMSV, we solve the posed problem by means of the ICT technique, keeping in mind its practical aspects. Besides, since reviews about the problem are lacking in the existing literature, so it is our intention to provide a rather comprehensive overview of the current research activities in the field.

Thus, we hope that, first of all, this paper and its extension [6] will repay the attention of mathematically inclined theoreticians working in a wide range of the applied scientific fields dealing with many-body effects that occur in diffusion-influenced reactions and other related topics.

#### References:

1. Traytak S.D.// Chem. Phys. Lett., v. 197, 1992, P. 247.
2. Traytak S.D.// J. Compos. Mech. Design., v. 9, 2003, P. 495.
3. Galanti M., Fanelli D., Traytak S.D., Piazza F.// Phys. Chem. Chem. Phys., v. 18, 2016, P. 15950.
4. Grebenkov D.S., Traytak S.D.// J. Comput. Phys., v. 379, 2019, P. 91.
5. Galanti M., Fanelli D., Traytak S.D., Piazza F.// in Chemical Kinetics Beyond the Textbook., (World Scientific, 2020), P. 321.
6. Traytak S.D.// Submitted to J. Chem. Phys.

# SIMULATION OF THE COMBUSTION FRONT DURING THE CATALYST OXIDATIVE REGENERATION

**O.S. Yazovtseva**

Steklov Mathematical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
8 Gubkina St., Moscow 119991, Russia  
Tel.: (+7 927)974-89-17, e-mail: [kurinaos@gmail.com](mailto:kurinaos@gmail.com)

**I.M. Gubaydullin**

Institute of Petrochemistry and Catalysis  
of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia  
141 prospect Oktyabrya, Ufa 450000, Russia  
Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia  
1 Kosmonavtov Street, Ufa 450000, Russia  
[irekmars@mail.ru](mailto:irekmars@mail.ru)

The investigation is devoted to mathematical modeling of the oxidative regeneration of the catalyst layer, in particular, to the study of the combustion front's conditions in the catalyst layer during regeneration [1]. The catalyst oxidative regeneration is the burning coke sediments out with oxygen-containing gas to restore catalytic activity.

The problems of burning coke sediments out associated with the exothermal reaction are well known. The coke combustion is accompanied by a sharp increase in temperature, which occurs at a certain point in time [2]. The combustion front moves along the catalyst layer, forming large temperature raising, which can lead to irreversible damage to the catalyst and the occurrence of dangerous situations in production [3].

Mathematical modeling of burning coke sediments from the catalyst allows us to effectively identify problem areas of combustion and explore the possibilities of process control by selecting initial data and technological parameters.

The catalyst layer regeneration model includes nonstationary diffusion-convection-reaction equations to describe chemical and diffusion processes in the catalyst grain. The boundary conditions correspond to the conditions of mass transfer between the gas in the grain and in the reaction mixture. The chemical interaction during combustion is described as the oxidation of carbon to its dioxide [2].

To simplify the formulation of the problem, the hypothesis of the the catalyst grain isothermicity is adopted. It allows not to take into account in the grain's thermal balance the change in temperature according to the linear parameters of grain [4].

The equations for accounting for the movement of gas in the catalyst layer are stationary transport equations, which corresponds to the model of ideal displacement [5]. The gas velocity is assumed to be constant [2].

The calculation of heat and mass transfer coefficients was carried out using similarity criterion [2]. The effective coefficients of thermal conductivity of the reaction mixture and the heat capacity of the catalyst grain are calculated taking into account the grain's chemical compositions and porosity [6]. The effective diffusion coefficient is calculated as the average harmonic coefficient of molecular and Knudsen diffusion, taking into account pore permeability [7].

The proposed model reflects well the real processes occurring in the catalyst layer during its regeneration [2]. The change in the input data significantly affects the process, for example, the speed of the combustion front movement largely depends on the speed of



the reaction mixture. This gives reason to believe the effectiveness of dynamic process control [8].

The computational algorithm is based on the finite-volume method. Due to the essential nonlinearity of the diffusion-convection-reaction equations are explicitly integrated. In this case, the transfer equations along the reactor are approximated by an implicit scheme, since it includes unknown functions linearly. The boundary conditions are also implicitly approximated: for some parameters, a significant temperature and concentration gradient occurs at the catalyst grain boundary.

The paper presents the results of modeling the catalyst layer in the process of oxidative regeneration under nonstationary boundary conditions.

The work of O.S. Yazovtseva was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 19-71-30012). The work of I.M. Gubaidullin was supported by the state task of the Institute of Petrochemistry and Catalysis of the UFIC RAS (topic No FMRS-2022-0078).

### References:

1. Balaev A.V., Drobyshevich V.I., Gubaydullin I.M., Masagutov R.M. Investigation of wave processes in the regenerators with a stationary layer of a catalyst // Propagation of heat waves in heterogeneous environments: a collection of scientific papers. Novosibirsk, Nauka, 1988. P. 233-246.
2. Reshetnikov S.I., Petrov R.V., Zazhigalov S.V., Zagoruiko A.N. Mathematical Modeling of Regeneration of Coked Cr-Mg Catalyst in Fixed Bed Reactors // Chemical Engineering Journal, 2020. V. 380. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122374.
3. Masagutov, R.M., Morozov, B.F., Kutepov, B.I. Regeneration of catalysts in oil processing and petrochemistry. USSR, Moscow, 1987.
4. Gubaydullin I.M., Peskova E.E., Yazovtseva O.S., Zagoruiko A.N. Numerical Simulation of Oxidative Regeneration of a Spherical Catalyst Grain // Mathematical Models and Computer Simulations, 2023. V. 15. P. 485–495. DOI: 10.1134/S2070048223030079.
5. Slinko M. G. Modeling of chemical reactors. Novosibirsk: Nauka, 1968. 96 p.
6. Yazovtseva O.S., Gubaydullin I.M., Peskova E.E., Sukharev L.A., Zagoruiko A.N. Computer Simulation of Coke Sediments Burning from the Whole Cylindrical Catalyst Grain // Mathematics, 2023. V. 11 (669). DOI: 10.3390/math11030669.
7. Malinovskaya O.A., Beskov V.S., Slinko M.G. Modeling of Catalytic Processes on Porous Granules. USSR: Novosibirsk, Russia, 1975. 50 p.
8. Gubaydullin I.M. Mathematical modelling of dynamic modes of oxidative regeneration of catalysts in motionless layer: dis. . . . kand. fiz.-mat. Nauk. Ufa, 1996. 109 p.

# ОЦЕНКА КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ СВЯЗЫВАНИЯ ЦИТОХРОМА С С ЦИТОХРОМОМ С<sub>1</sub> И III ДЫХАТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ В МОДЕЛИ БРОУНОВСКОЙ ДИНАМИКИ

А.М. Абатурова, Г.Ю. Ризниченко

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Биологический факультет, кафедра биофизики, Москва, Россия

119992, Ленинские горы, 1-12

Tel.: (+7495)9390289, e-mail: abaturova@list.ru

Белок-белковое связывание важно во многих биохимических и биологических процессах. Экспериментальные исследования не дают полную картину процесса связывания белков в геометрически сложном пространстве, наблюдаемом в клетке. Для более подробного исследования этого процесса применяют методы компьютерного моделирования, в частности, метод броуновской динамики.

Водорастворимый небольшой белок (12кДа) цитохром С (цитС) при окислительном фосфорилировании в митохондриях переносит электроны в межмембранном пространстве и кристах. Расширение люмена крист митохондрий нарушает работу цепи электронного транспорта на участке от III к IV дыхательному комплексу, где незаменимым переносчиком электрона является цитохром С.

В данной работе была построена модель диффузии цитС (pdb ID 3O1Y) и связывания с водорастворимой частью субъединицы цитохрома С<sub>1</sub> (цитС<sub>1</sub>) или димером III дыхательного комплекса (III<sub>2</sub>, 1BGY) с помощью программы броуновской динамики ProKSim [1]. Для оценки значений параметров связывания белков использовались экспериментальные значения константы скорости связывания белков в растворе [2]. Для расчета электростатического потенциала вокруг белковых молекул использовали формализм Пуассона-Больцмана. Заряды на атомах белка были распределены в соответствии с силовым полем CHARMM27, дополненным параметрами для гема и железо-серного кластера, значение рН принято равным 7.

По результатам численных экспериментов были оценены значения константы образования предварительных комплексов белков при энергии электростатического взаимодействия по модулю больше 3.2-3.7 кТ и расстоянии между атомами Fe цитохромов меньше 33-37 Å при ионной силе 130-350 мМ. Численный эксперимент повторяли 7000 раз. Константа связывания белков при энергии электростатического взаимодействия белков -3.7кТ и расстоянии между атомами Fe цитС-цитС<sub>1</sub> менее 35 Å для ионной силы 130 мМ была оценена по формуле [3] через вероятность образования комплекса молекулами цитС, изначально отстоявшими от цитС<sub>1</sub> на 74 Å, и по кинетической кривой через среднее время ассоциации молекул [4]. Значения константы скорости, оцененные обоими методами, совпали, но погрешность в методе [3] была выше. Поэтому для остальных оценок константа рассчитывалась через среднее время ассоциации молекул [4]. Модельная и экспериментальная зависимость константы связывания цитС и III<sub>2</sub> от ионной силы лучше всего совпали при энергии электростатического взаимодействия белков -3.7кТ и максимальном расстоянии между атомами Fe цитС-цитС<sub>1</sub> 35 Å. Константа связывания цитС и III<sub>2</sub>, полученная в модели,

была меньше экспериментальных значений на 16% при ионной силе 130 мМ и на 6% - при ионной силе 350мМ.

Полученная в модели зависимость константы связывания от ионной силы для цитС и цитС<sub>1</sub> была более выраженной, чем для реакции цитС и III<sub>2</sub>. Данный результат обусловлен тем, что вдоль поверхности III<sub>2</sub> по сравнению с цитС<sub>1</sub> есть дополнительные участки, способствующие притяжению цитС при ионной силе 350 мМ и отталкиванию при 130 мМ. В результате наблюдается стабилизация молекул цитС у поверхности III<sub>2</sub> и устойчивость митохондрий к изменению ионной силы.

Оцененные в работе значения параметров модели для реакции в растворе необходимы при построении модели реакции в люмене кристы митохондрии.

*Исследование выполнено в рамках научного проекта государственного задания МГУ № 121032500060-0.*

#### **Список литературы:**

1. Хрущев С. С., Абатурова А. М., Дьяконова Д. М., Устинин Д. В., Зленко В. А., Федоров В. А., Коваленко И. Б., Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б. Моделирование белок-белковых взаимодействий с применением программного комплекса многочастичной броуновской динамики ProKSim // Компьютерные исследования и моделирование. М. 2013. Вып. 5. № 1. С. 47-64. DOI: 10.20537/2076-7633-2013-5-1-47-64
2. Engstrom G., Rajagukguk R., Saunders A. J., et al. Design of a ruthenium-labeled cytochrome c derivative to study electron transfer with the cytochrome bc<sub>1</sub> complex // Biochemistry. 2003. Marth. vol. 42(10). pp. 2816-2824. DOI: 10.1021/bi027213g
3. Northrup Scott H., Allison Stuart A., Andrew McCammon J. Brownian dynamics simulation of diffusion-influenced bimolecular reactions // J. Chem. Phys. 1984. Marth. vol. 80. pp. 1517-1524. DOI:10.1063/1.446900
4. Хрущев С. С., Абатурова А. М., Дьяконова А. Н., Федоров В. А., Устинин Д. М., Коваленко И. Б., Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б. Моделирование взаимодействий белков фотосинтетической электрон-транспортной цепи фотосинтеза методом броуновской динамики // Биофизика. 2015. Т. 60. № 2. С. 270-292. DOI: 10.1134/S0006350915020086

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В НАНОСУСПЕНЗИЯХ С ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Найдан Алексич<sup>1</sup>, Бранислав Алексич<sup>2</sup> и Людмила Уварова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Сербская академия нелинейных наук, Белград, Сербия

<sup>2</sup>Weill Cornell Medicine - Qatar, Доха, Катар

<sup>3</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

Вадковский переулок, 1, Москва, 127055, Россия

najdan@gmail.com; bna2004@qatar-med.cornell.edu; uvar11@yandex.ru

Жидкие суспензии диэлектрических или металлических наночастиц с нелинейными свойствами представляют большой интерес в последние несколько десятилетий. Оптическая нелинейность может привести к стабильному распространению с низкими потерями и глубоким проникновением света, что может быть использовано для неинвазивной инициации и контроля химических и/или кинетических процессов, а также для высокоразрешающих оптических приборов. С момента первоначальных исследований Ашкина [1] было проведено ряд исследований, рассматривающих различные нелинейные явления в диэлектрических суспензиях, включая модуляционную неустойчивость и самоиндуцированную прозрачность [2,3].

Нелинейное уравнение Шредингера представляет собой упрощенную модель, описывающую взаимодействие лазерного излучения с коллоидной наносуспензией в результате действия градиентной силы, притягивающей или отталкивающей частицы из центральной области лазерного луча [3]. Однако, необходимо учитывать и другие факторы, особенно в биологических исследованиях и в суспензиях с мезочастицами, где рассеяние света может быть значительным, что может привести к нелокальному динамическому самонаправлению света. Сила поглощения также оказывает аналогичное воздействие, из-за поглощения излучения среда нагревается что может привести к тепловой нелинейности из-за неоднородного нагрева среды и эффективному нелокальному нелинейному ответу среды.

В работе, в приближении невзаимодействующих частиц, рассматривается самозахват лазерного излучения в наносуспензиях, учитывающая эффект градиентной силы и тепловой диффузии в поле неоднородной температуры. Определена область существования стабильного распространения лазерного излучения.

## Список литературы

1. Ashkin, A., Dziedzic, J.M., Smith, P.W., Opt. Lett. 7(6), 276–278 (1982); Smith, P.W., Maloney, P.J., Ashkin, A., Opt. Lett. 7(8), 347–349 (1982); Smith, P.W., Ashkin, A., Bjorkholm, J.E., Eilenberger, D.J., Opt. Lett. 9(4), 131–133 (1984).
2. Ashkin, A., Dziedzic, J.M., Bjorkholm, J.E., Chu, S; Opt. Lett.11(5), 288–290 (1986); El-Ganainy, R., Christodoulides, D.N., Wright, E.M., Lee, W.M., Dholakia, K., Phys. Rev. A 80, 053805 (2009);
3. El-Ganainy, R., Christodoulides, D.N., Rotschild, C., Segev, M.; Opt. Express 15(16), 10207–10218 (2007).

# ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ С НЕКЛАССИЧЕСКИМ ЗАКОНОМ ДВИЖЕНИЯ В ГИДРАТОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ

А.Э. Бакир<sup>1</sup>, Ю.А. Повешенко<sup>2</sup>, В.О. Подрыга<sup>2</sup>, П.И. Рагимли<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МФТИ, Долгопрудный, Моск. обл., Россия

141701, Институтский переулок, д. 9,

<sup>2</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

125047, Миусская пл., д. 4,

E-mail: bakirae@phycstech.com

В последнее десятилетие наблюдается значительный рост исследований и разработок, связанных с гидратами, особенно в области использования их в качестве средства для хранения и добычи газа [1]. Было доказано, что гидраты могут способствовать круговороту углерода в океане, глобальному изменению климата и стабильности прибрежных отложений. Вечная мерзлота и морская среда содержат огромное количество метана в виде газогидратов. Природный газ добывается по всему миру, в том числе на Аляске, в Сибири, Японии, Северо-Западных территориях Канады и Китае. Однако образование газовых гидратов может привести к различным формам блокировок в процессах добычи и транспортировки нефти-газа, что приводит к высоким капитальным и эксплуатационным затратам.

Математическое описание движения жидкостей и газов в пористой среде основано на уравнениях механики сплошных сред, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии [2]. Эти же законы можно использовать для изучения фильтрации с учетом диссоциации газогидратов [3–4].

В работе для моделирования процессов в гидратно-равновесной зоне предлагается пространственная двухкомпонентная (H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) трехфазная (гидрат, свободная вода и газ) модель фильтрации с учетом диссоциации газовых гидратов, основанная на расщеплении по физическим процессам, с использованием неклассического закона движения (с учетом его нелинейности). Представленная математическая модель позволяет рассчитывать двумерные течения в областях с нерегулярной структурой пластов. С ее помощью можно проводить как профильные, так и площадные расчеты, учитывая при этом сложную геометрию осадочных бассейнов.

Уравнение балансов массы воды и газа представлены следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} \{m(S_v S_w \rho_w + (1 - S_v) \rho_v \beta_w)\} + \text{div}[\rho_w \mathbf{V}_w] + q_w = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \{m(S_v (1 - S_w) \rho_g + (1 - S_v) \rho_v (1 - \beta_w))\} + \text{div}[\rho_g \mathbf{V}_g] + q_g = 0. \quad (2)$$

Уравнение баланса энергии имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \{m(S_v (S_w \rho_w \varepsilon_w) + (1 - S_w) \rho_g \varepsilon_g) + (1 - S_v) \rho_v \varepsilon_v + (1 - m) \rho_s \varepsilon_s\} + \\ + \text{div} \{ \rho_w \varepsilon_w \mathbf{V}_w + \rho_g \varepsilon_g \mathbf{V}_g + P(\mathbf{V}_w + \mathbf{V}_g) \} + \text{div} \mathbf{W} + q_s = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mathbf{W} = -\left(m(S_v(S_w\lambda_w + (1-S_w)\lambda_g) + (1-S_v)\lambda_v) + (1-m)\lambda_s\right)\nabla T$  – тепловой поток.

Индексы  $g, w, v, s$  относятся к газу, воде, гидрату, скелету пористой среды;  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $t$  – время,  $m = m(\mathbf{r}, P)$  – пористость,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор,  $S_w$  – водонасыщенность,  $S_g = 1 - S_w$  – газонасыщенность,  $v$  – гидратонасыщенность,  $S_v = 1 - v$  – растепленность,  $\beta_w$  – массовая доля воды в гидрате,  $\rho_l = \rho_l(P, T)$ ,  $\varepsilon_l = \varepsilon_l(P, T)$ ,  $\lambda_l = \lambda_l(P, T)$  – плотности, внутренние энергии, коэффициенты теплопроводности компонент ( $l = g, w, v, s$ ),  $\mathbf{V}_\alpha, q_\alpha$  – скорость фильтрации и плотность источников фазы  $\alpha = w, g$ .

Для скорости фильтрации жидкости и газа в пористой среде можно использовать классический закон Дарси, который является традиционным для задач поровой гидродинамики подземных сред [5]. Однако, для исследуемого класса задач в условиях пониженной проницаемости при невысоких перепадах давления используется неклассический закон движения (с учетом его нелинейности), который предложен для двухфазной модели в работе [6]. Закон движения с начальным градиентом имеет вид:

$$\mathbf{V}_\alpha = \begin{cases} -\frac{k \cdot k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} \left( \frac{|\nabla P| - G_{\min}}{|\nabla P| + c_\alpha} \right) \nabla P, & |\nabla P| > G_{\min}, \\ 0, & |\nabla P| \leq G_{\min} \end{cases}, \quad \alpha = w, g, \quad (4)$$

$$c_\alpha = \frac{G_{\text{pseudo}} - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\text{pseudo}}} G_{\max},$$

где  $k = k(\mathbf{r}, S_v, P)$  – абсолютная проницаемость;  $k_{r\alpha} = k_{r\alpha}(S_w)$  – относительные фазовые проницаемости;  $\mu_\alpha = \mu_\alpha(P, T)$  – вязкости воды и газа;  $G_{\min}$  – минимальный градиент давления, который необходимо флюиду преодолеть при прохождении через пористую среду;  $G_{\max}$  – максимальный стартовый градиент давления, который должен преодолеть флюид при прохождении через пористую среду;  $G_{\text{pseudo}}$  – псевдоначальный (квазиначальный) градиент давления. В случае, когда  $c_\alpha = 0$  и  $G_{\min} = 0$ , уравнение (4) представляет собой классическую модель течения Дарси.

Зависимость переменных от давления и температуры в зоне фазового равновесия в итоге сводится к зависимости от давления, так как это обусловлено законами термодинамики и фазовым равновесием [7]:

$$T = T_{\text{dis}}(P) = A \ln P + B, \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирические константы.

Удельная энтальпия гидрата определяется как сумма удельных энтальпий газа и жидкости, которые входят в его состав с учетом теплоты фазового перехода:

$$\beta_w i_w + (1 - \beta_w) i_g = i_v + h, \quad (6)$$

где  $h$  – скрытая теплота фазового перехода единицы массы гидрата,

$$i_l = \varepsilon_l + P/\rho_l \quad (7)$$

– энтальпия, индекс  $l \equiv g|w|v|s$  указывает фазу.

Уравнения состояния для газа, воды и гидрата имеют вид:

$$\rho_g = \frac{PM}{z_g RT}, \quad \rho_w = const, \quad \rho_v = const. \quad (8)$$

Здесь  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $M$  – молярная масса газа,  $z_g$  – коэффициент сверхсжимаемости.

Для данной модели исходная система уравнений расщепляется на функциональные блоки: блок насыщения, обладающий преимущественно гиперболическими свойствами, и уравнение диссипативной пьезопроводности для давления, имеющее в основном параболические свойства. Такое расщепление позволяет применять явно- неявные разностные схемы при решении задач и избежать сильного измельчения шага по времени. Получившаяся система уравнений состоит из сатурационного блока, который отвечает за процесс переноса насыщенностей (водо-, газо- и гидратонасыщенности) при фиксированном давлении (уравнения (1) и (2)), и блока, описывающего диссипативно-пьезопроводные процессы при фиксированных насыщенностях, учитывая твердофазные включения:

$$\begin{aligned} & m\delta_\varepsilon \left\{ S_v \left[ S_w \frac{(\rho_w)_t}{\rho_w} + (1-S_w) \frac{(\rho_g)_t}{\rho_g} \right] + (1-S_v) \frac{(\rho_v)_t}{\rho_v} + \frac{(m)_t}{m} \right\} + \\ & + \frac{\Psi}{m\rho_v} \left\{ m \left\{ S_v \left[ S_w \rho_w (\varepsilon_w)_t + (1-S_w) \rho_g (\varepsilon_g)_t \right] + (1-S_v) \rho_v (\varepsilon_v)_t \right\} + \right. \\ & \left. + [(1-m)\rho_s \varepsilon_s]_t \right\} + \delta_\varepsilon \text{DIG} + \frac{\Psi}{m\rho_v} \text{DIG}_\varepsilon = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\text{DIG} = \frac{1}{\rho_w} \text{div}(\rho_w \mathbf{V}_w) + \frac{1}{\rho_g} \text{div}(\rho_g \mathbf{V}_g) + \left( \frac{q_w}{\rho_w} + \frac{q_g}{\rho_g} \right), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{DIG}_\varepsilon = & [\text{div}(\rho_w \varepsilon_w \mathbf{V}_w) - \varepsilon_w \text{div}(\rho_w \mathbf{V}_w)] + [\text{div}(\rho_g \varepsilon_g \mathbf{V}_g) - \varepsilon_g \text{div}(\rho_g \mathbf{V}_g)] + \\ & \text{div}[P(\mathbf{V}_w + \mathbf{V}_g)] + \text{div} \mathbf{W} + (q_\varepsilon - \varepsilon_w q_w - \varepsilon_g q_g). \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь

$$\frac{\Psi}{m\rho_v} = \left( \varphi - \frac{1}{\rho_v} \right) \geq 0, \quad \varphi = \frac{\beta_w}{\rho_w} + \frac{1-\beta_w}{\rho_g} \quad (12)$$

– скачок удельного объема (на единицу массы),

$$\delta_\varepsilon = \beta_w \varepsilon_w + (1-\beta_w) \varepsilon_g - \varepsilon_v \geq 0 \quad (13)$$

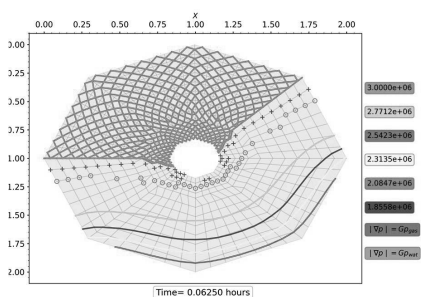
– скачок удельной внутренней энергии (на единицу массы).

Для решения задачи (1), (2), (9) применен и программно реализован метод опорных операторов [8]. Этот метод позволяет рассчитывать процессы фильтрации в средах с разрывными физическими свойствами, что достигается использованием нерегулярных сеток. В результате появляется возможность моделировать зоны сдвига и

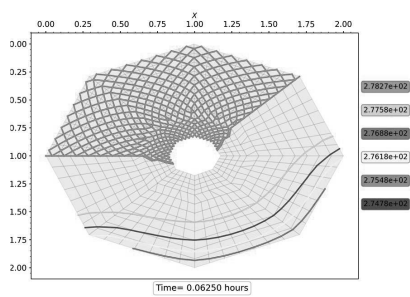
получать численное решение в условиях разномасштабности задачи. При этом на сетках с крупными ячейками, где присутствуют разрывы материальных свойств, сохраняется качественная аппроксимация переноса насыщенностей и градиентов термодинамических величин. Построенная сеточная модель также аппроксимирует тождества метода опорных операторов на различных слоях по времени.

На основе разработанной вычислительной технологии создан программный комплекс, инструментальные средства которого способны на сетках нерегулярной структуры решать двумерные задачи многофазного и многокомпонентного моделирования процессов диссоциации газовых гидратов в пористой среде осадочных бассейнов литологически сложной структуры. Для тестирования программного комплекса проведены модельные расчеты в трехфазной среде с гидратизированными твердофазными включениями в двумерном случае на нерегулярных сетках.

На рис. 1-2 показаны распределения давления и температуры в момент времени  $t=0.0625$  ч. На этих рисунках значения в верхней части пространственной области постоянны и равны их начальным. Исходя из пространственного расположения маркеров градиента давления, возможно провести оценку извлекаемости углеводородных ресурсов при различных конфигурациях пространственной области.



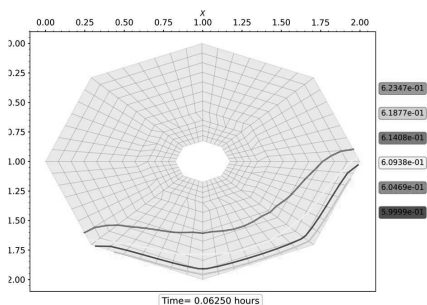
**Рис. 1.** Распределение давления в момент времени  $t=0.0625$  ч. Значения давления (МПа) на разных линиях уровня: 1.8558, 2.0847, 2.3135, 2.5423, 2.7712. Маркеры “+” соответствуют модулю градиента для газа ( $G_{min}=0.15$  МПа/м), маркеры “o” – для воды ( $G_{min}=0.3$  МПа/м).



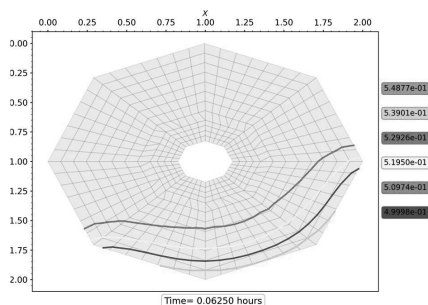
**Рис. 2.** Распределение температуры в момент времени  $t=0.0625$  ч. Значения температуры (К) на разных линиях уровня: 274.78, 275.48, 276.18, 276.88, 277.58.

На рис. 3-4 показаны распределения водонасыщенности ( $S_w$ ), и растепленности ( $S_v$ ) в момент времени  $t=0.0625$  ч. В связи с отбором газа на нижней границе области, водонасыщенность  $S_w$  внутри области меньше, чем на этой нижней границе (Рис. 3). Наблюдаемый на рис. 4 процесс гидратного растепления  $S_v$  сопутствует задаваемому в граничной части области депрессионному газовому отбору. Поэтому значения растепленности вблизи нижней границы области больше, чем в ее внутренней части.





**Рис. 3.** Распределение водонасыщенности в момент времени  $t=0.0625$  ч. Значения водонасыщенности на разных линиях уровня: 0.60469, 0.60938, 0.61408, 0.61877.



**Рис. 4.** Распределение растепленности в момент времени  $t=0.0625$  ч. Значения растепленности на разных линиях уровня: 0.50974, 0.5195, 0.52926, 0.53901.

### Список литературы

1. Englezos P. and J.D. Lee, Gas hydrates: a cleaner source of energy and opportunity for innovative technologies // Korean Journal of Chemical Engineering, v.22, №5. 2005, P. 671-681.
2. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная Гидромеханика. - М.: Недра, 1993.
3. Повешенко О.Ю., Гасилова И.В., Галигузова И.И., Дорофеева Е.Ю., Ольховская О.Г., Казакевич Г.И. Об одной модели флюидодинамики в пористой среде, содержащей газогидраты // Математическое моделирование, т.25, №10. 2013, С.32–42.
4. Poveshchenko Yu.A, Rahimly P.I., Rahimly O.R., Podryga V.O., Gasilova I.V. A numerical approach to study the thermal influence on gas hydrates by physical process splitting // International Journal of Numerical Analysis and Modeling, v.17, №3. 2020, P. 404–433.
5. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое Моделирование Пластовых Систем. – Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
6. Su H., Wang D., Zhang P., An Y., Fu Y., Lu J., Huang F., Zhang H., Ren Z., Li Z. A new method to calculate the relative permeability of oil and water in tight oil reservoirs by considering the nonlinear flow // Geofluids, v.2022. 2022, Art. 9450967 (14p.).
7. Бондарев Э.А., Бабе Г.Д., Гройсман А.Г., Каниболотский М.А. Механика Образования Гидратов в Газовых Потоках. – Москва: Наука, 1976.
8. Самарский А.А., Колдоба А.В., Повешенко Ю.А., Тишкин В.Ф., Фаворский А.П. Разностные Схемы на Нерегулярных Сетках. – Минск: ЗАО «Критерий», 1996.

# ПРЕОБРАЗОВАНИЕ БЭКЛУНДА В СОТАХ В БРИЗЕР ТРЕХ СОЛИТОНОВ В МАГНЕТИКЕ

С.А. Беклемишев

МИРЭА - Российский Технологический Университет, Москва

107996, ул. Стромынка, 20

Тел.: (+7 985) 763-76-32, e-mail: [beklemishevs@rambler.ru](mailto:beklemishevs@rambler.ru)

Пусть межатомная связь (поле или пустое от атомов пространство между ними), по которой распространяются упругие волны по кристаллической структуре, следуя за этой структурой, имеет вид графа. Его геометрия гексагональная и плоская. Будем исследовать на гексагональной решетке особые из-за геометрии бризеры Двойного уравнения Синус –Гордона (ДСГ). В гексагональной решетке рассмотрим сложение в бризер 3 бегущих издали солитонов подобного друг другу типа  $v_1, v_2, v_3$ . Пусть три солитона сошлись с трех сторон, под углом 120 градусов каждая, в центр решетки  $u_n$  в их сумму в виде резольвенты Лагранжа кубического уравнения [1] с 3 корнями  $v_1, v_2, v_3$ . Надо найти выражение для бризера  $u_n$ , решив полученные далее уравнения.

$$u_n = v_1 + \varepsilon^2 v_2 + \varepsilon v_3.$$

$$\varepsilon = \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2}.$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = -3 \sin \frac{u}{3} - C \sin \frac{u}{6}.$$

$$C = \cos \frac{v_1 + \varepsilon^2 v_3}{6} + \cos \frac{v_1 + \varepsilon \cdot v_2}{6} + \cos \frac{\varepsilon \cdot v_2 + \varepsilon^2 v_3}{6}.$$

Вид исходных для этого ДСГ – непрерывного уравнения, уравнений равновесия ближайших соседей в решетке типа соты плоского кристалла спинов модели Гейзенберга, есть дискретные, и условно, разностные уравнения равновесия, которые без учета одинакового для каждого из них слагаемого уравнения СГ, типа

$$\frac{\partial^2 u_n}{c^2 \cdot \partial t^2},$$

где  $c^2 = 2AJS^2 \hbar^2 / \hbar^2$ , например, предельная скорость звука магновов среды в квадрате, описывают 3 параллельных цепи в сотах на плоскости

$$\sin(u_{n+1} - u_n) - \sin(u_n - u_{n-1}) - \sin(u_n - \psi_{n-1}) = a \cdot \sin(u_n).$$

$$\sin(\psi_{n+1} - \psi_n) - \sin(\psi_n - \psi_{n-1}) - \sin(\psi_n - \varphi_{n-1}) = a \cdot \sin(\psi_n).$$

$$\sin(u_n - \psi_{n-1}) - \sin(\psi_{n-1} - \psi_{n-2}) + \sin(\psi_n - \psi_{n-1}) = a \cdot \sin(\psi_{n-1}).$$

Атом связан в цепи с тремя ближайшими соседями синусоидальной силой и уравновешен в правой части уравнений синусоидальной подложкой всего кристаллического поля с некоторой амплитудой типа  $a, b, c$ . Далее эти амплитуды

$a, b, c = gm_B B^x / JS$  величины нормированного внешнего магнитного поля, где  $m_B$  - магнетон Бора и  $g$  - гиромагнитное отношение,  $\hbar$  - постоянная Планка с чертой,  $h$  - межатомное расстояние в цепочке,  $J$  - энергия обменного взаимодействия между соседними спинами  $S$ ,  $A$  - энергия анизотропии. Плоскость легкого намагничивания  $xy$  перпендикулярна оси  $z$  каждой цепочки спинов. Внешнее магнитное поле  $B^x$ , направленное вдоль оси  $x$ , разрушает симметрию в плоскости  $xy$ . Спин  $S_n$  - классический вектор, направление которого в плоскости "xy" отсчитывается от оси абсцисс и определяется углом  $u_n$ , а в перпендикулярной плоскости другим углом сферической системы координат. Силы смещения на этом примере трех уравнений трех цепей смещают положение или угол спина атома с номером  $n$  в цепи. В каждой из 3-х цепочек эти линейные координаты смещения по длине с номерами  $n$  заданы своей

$$\begin{aligned} & \sin(u_{n+1} - u_n) - \sin(u_n - u_{n-1}) + \sin(\psi_n - \psi_{n-1}) - \sin(\psi_{n-1} - \psi_{n-2}) = \\ & = a(\sin u_n + \sin \psi_{n-1}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sin(\psi_{n+1} - \psi_n) + \sin(u_n - \psi_{n-1}) - \sin(\psi_{n-1} - \psi_{n-2}) - \sin(\psi_n - \psi_{n-1}) = \\ & = a(\sin \psi_n + \sin \psi_{n-1}). \end{aligned}$$

Будем искать экстремальное волновое решение, которое ведет себя вдали от атома с номером  $n$  так, как солитон в одномерной цепи. Решим уравнение, которое является одной из двух одинаковых частей первого уравнения для одной линии цепи.

$$\sin(u_{n+1} - u_n) - \sin(u_n - u_{n-1}) = a(\sin u_n).$$

$$u_n'' = a \cdot \sin(u_n).$$

$$(u_n')^2 = 2a \cdot (1 - \cos(u_n)).$$

При этом выбрана экстремальная константа интегрирования особого решения уравнения, как полная энергия для выражения кинетической энергии через потенциальную, с особым максимальным положительным квадратом скорости  $(u_n')^2$ .

Используем формулу для косинуса через квадрат синуса половинного угла в следующем, и еще раз, через 3 последующих, выражениях для простейшего кинка.

$$(u_n')^2 = 4a \cdot \sin^2\left(\frac{u_n}{2}\right).$$

$$(u_n') = 2\sqrt{a} \cdot \sin\left(\frac{u_n}{2}\right).$$

$$(u_n') \sin \frac{u_n}{2} = 2\sqrt{a} \cdot \sin^2\left(\frac{u_n}{2}\right) = 2\sqrt{a} \cdot (1 - \cos^2 \frac{u_n}{2}) = 2\sqrt{a} \cdot (1 - \cos \frac{u_n}{2}) \cdot (1 + \cos \frac{u_n}{2}).$$

$$\sqrt{a} \cdot n = \frac{1}{2} \int \left( \frac{d(1 - \cos \frac{u_n}{2})}{(1 - \cos \frac{u_n}{2})} - \frac{d(1 + \cos \frac{u_n}{2})}{(1 + \cos \frac{u_n}{2})} \right) = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1 - \cos \frac{u_n}{2}}{1 + \cos \frac{u_n}{2}} \right| = \ln \left| \frac{\sin \frac{u_n}{4}}{\cos \frac{u_n}{4}} \right|.$$

$$u_n = 4 \operatorname{arctg} \exp(n\sqrt{a}).$$

Преобразование Бэклунда (ПБ), обычно записываемое на 2 функциях, на 3 таких функциях даст бризер, особенного вида, далее  $u$ . Преобразование типа ПБ состоит из следующих типичных пар уравнений с амплитудой  $b$  и  $\frac{1}{4b}$  каждое на одно из 3 направлений, дающих в сумме исходное уравнение ДСГ на гексагональной решетке после повторного смешанного дифференцирования и тройного сложения всех 3 уравнений по 3 направлениям. Пара уравнений с амплитудами  $b$  и  $\frac{1}{4b}$  есть

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{u - v_1 - \varepsilon v_3}{6} \right) = b \left( 2 \cos \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3}{6} + 1 \right).$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3}{6} \right) = \frac{1}{4b} \left( 2 \cos \frac{u - v_1 - \varepsilon v_3}{6} + 1 \right).$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left( \frac{u - v_1 - \varepsilon v_3}{6} \right) = b \left( -2 \left( \sin \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3}{6} \right) \frac{1}{4b} \left( 2 \cos \frac{u - v_1 - \varepsilon v_3}{6} + 1 \right) \right).$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left( \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3}{6} \right) = b \left( -2 \left( \sin \frac{u - v_1 - \varepsilon v_3}{6} \right) \frac{1}{4b} \left( 2 \cos \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3}{6} + 1 \right) \right).$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} = -3 \sin \frac{u}{3} - \sin \frac{u}{6} \cdot \left( \cos \frac{v_1 + \varepsilon v_3}{6} + \cos \frac{v_1 + \varepsilon^2 v_2}{6} + \cos \frac{\varepsilon^2 v_2 + \varepsilon v_3}{6} \right).$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{u - \varepsilon^2 v_2 - \varepsilon v_3}{6} \right) = a \left( 2 \cos \frac{u + \varepsilon^2 v_2 + \varepsilon v_3}{6} + 1 \right).$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{u - v_1 - \varepsilon v_3}{6} \right) = b \left( 2 \cos \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3}{6} + 1 \right).$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{u - v_1 - \varepsilon^2 v_2}{6} \right) = c \left( 2 \cos \frac{u + v_1 + \varepsilon^2 v_2}{6} + 1 \right).$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{v_1}{6} \right) = a \left( 2 \cos \frac{v_1}{6} + 1 \right).$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\varepsilon^2 v_2}{6} \right) = b \left( 2 \cos \frac{\varepsilon^2 v_2}{6} + 1 \right).$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\varepsilon v_3}{6} \right) = c \left( 2 \cos \frac{\varepsilon v_3}{6} + 1 \right).$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{u}{6} \right) = a \left( 2 \cos \frac{v_1}{6} + 1 \right) + b \left( 2 \cos \frac{\varepsilon^2 v_2}{6} + 1 \right) + c \left( 2 \cos \frac{u + v_1 + \varepsilon^2 v_2}{6} + 1 \right).$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{u}{6} \right) = a \left( 2 \cos \frac{v_1}{6} + 1 \right) + c \left( 2 \cos \frac{\varepsilon v_3}{6} + 1 \right) + b \left( 2 \cos \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3}{6} + 1 \right).$$

$$c \left( \cos \frac{u + v_1 + \varepsilon^2 v_2}{6} - \cos \frac{\varepsilon v_3}{6} \right) = b \left( \cos \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3}{6} - \cos \frac{\varepsilon^2 v_2}{6} \right).$$

$$c \left( \sin \frac{u + v_1 + \varepsilon^2 v_2 + \varepsilon v_3}{12} \sin \frac{u + v_1 + \varepsilon^2 v_2 - \varepsilon v_3}{12} \right) =$$

$$= b \left( \sin \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3 + \varepsilon^2 v_2}{12} \sin \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2}{12} \right).$$

$$a \left( \sin \frac{u + \varepsilon v_3 + \varepsilon^2 v_2 - v_1}{12} \right) = c \left( \sin \frac{u + v_1 + \varepsilon^2 v_2 - \varepsilon v_3}{12} \right) = b \left( \sin \frac{u + v_1 + \varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2}{12} \right).$$

$$c \left( \sin \frac{u}{12} \cos \frac{v_1 + \varepsilon^2 v_2 - \varepsilon v_3}{12} + \cos \frac{u}{12} \sin \frac{v_1 + \varepsilon^2 v_2 - \varepsilon v_3}{12} \right) =$$

$$= b\left(\sin\frac{u}{12}\cos\frac{v_1 + \varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2}{12} + \cos\frac{u}{12}\sin\frac{v_1 + \varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2}{12}\right).$$

$$c\left(\operatorname{tg}\frac{u}{12}\cos\frac{v_1 - (\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12} + \sin\frac{v_1 - (\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right) =$$

$$= b\left(\operatorname{tg}\frac{u}{12}\cos\frac{v_1 + (\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12} + \sin\frac{v_1 + (\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right).$$

$$c\left(\operatorname{tg}\frac{u}{12}\left(\cos\frac{v_1}{12}\cos\frac{(\varepsilon v_3 - v_2)}{12} + \sin\frac{v_1}{12}\sin\frac{(\varepsilon v_3 - v_2)}{12}\right) +\right.$$

$$\left. + \sin\frac{v_1}{12}\cos\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12} - \cos\frac{v_1}{12}\sin\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right) =$$

$$= b\left(\operatorname{tg}\frac{u}{12}\left(\cos\frac{v_1}{12}\cos\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12} - \sin\frac{v_1}{12}\sin\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right) +\right.$$

$$\left. + \sin\frac{v_1}{12}\cos\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12} + \cos\frac{v_1}{12}\sin\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right).$$

Делим все на  $\cos\frac{v_1}{12}\cos\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}$ .

$$c\left(\operatorname{tg}\frac{u}{12}\left(1 + \operatorname{tg}\frac{v_1}{12}\operatorname{tg}\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right) + \operatorname{tg}\frac{v_1}{12} - \operatorname{tg}\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right) =$$

$$= b\left(\operatorname{tg}\frac{u}{12}\left(1 - \operatorname{tg}\frac{v_1}{12}\operatorname{tg}\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right) + \operatorname{tg}\frac{v_1}{12} + \operatorname{tg}\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right).$$

$$\operatorname{tg}\frac{u}{12} = \frac{\left(\operatorname{tg}\frac{v_1}{12} + \frac{b+c}{b-c}\operatorname{tg}\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12}\right)}{\frac{b+c}{b-c}\operatorname{tg}\frac{v_1}{12}\operatorname{tg}\frac{(\varepsilon v_3 - \varepsilon^2 v_2)}{12} - 1}.$$

Итак, мы применили циклическую симметрию перестановок корней в резольвенте Лагранжа, использовали симметрию решения дифференциального уравнения в частных производных, чтобы разделить его на два обыкновенных дифференциальных уравнения ПБ. Мы обнаружили решение бризер в сотах в виде решетки плоского кристалла благодаря преобразованиям симметрии.

Куперовские пары разрушаются магнитным полем, однако, появились сверхпроводники на основе магнетиков, в которых роль фононов передана магнонам

на границе температур существования подсистем этих фаз. Симметрия уравнений движения колебаний спинов допускает возможность рассеяния на них куперовских пар другой подсистемы. В гексагональной решетке из цепочек спинов ферромагнетика Гейзенберга автопреобразования Бэклунда (ПБ) над  $4\pi$ -кинк-решением уравнения типа Синус-Гордона (СГ) приводят к решениям и в виде нелокализованного колебания, и к кинку и бризеру, локализованным в решетке. Энергии их локализации (пиннинга) на узлах цепочки спинов определяют критическое магнитное поле кинков, его связь с пределом амплитуды, ширины и скорости бегущих локализованных колебаний. Двухканальное квантовое уравнение Шредингера, полученное из ПБ, описывает рассеяние кинком нелокализованного колебания. Конфигурация спинов в гексагональной решетке из цепочек спинов ферромагнетика Гейзенберга с плоскостью легкого намагничивания описывается условно разностными уравнениями типа СГ.

Энергии локализации (пиннинга) на узлах цепочки спинов определяют критическое магнитное поле кинков, его связь с пределом амплитуды, ширины и скорости бегущих локализованных колебаний. Двухканальное квантовое уравнение Шредингера, полученное из ПБ в паре с операторным эволюционным уравнением, описывает рассеяние кинком нелокализованных колебаний. Структура  $4\pi$ -кинка и бризера в ангармонически связанной цепочке с дважды перевернутым спином составлена из участков «разрежения» по краям и «уплотнения» в центре кинка.  $4\pi$ -кинк задается уравнениями движения спинов, как для одномерной, так и гексагональной решетки.

#### Список литературы

1. Беклемишев С.А. Клочихин В.Л. Пиннинг солитонов в кристаллическом поле магнетика. // Вестник МГТУ им Н.Э. Баумана, Серия естественные науки. № 1. 2009 г. С. 56-66

# ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Д.В. Белова

РТУ МИРЭА, Москва, Россия

119454 г. Москва, проспект Вернадского, дом 78

Тел.: +7 999 832-45-11, e-mail: [belova\\_d@mirea.ru](mailto:belova_d@mirea.ru)

Разностные уравнения являются эффективным инструментом для численного решения дифференциальных уравнений, особенно в случаях, когда аналитическое решение затруднительно или невозможно. Они позволяют дискретизировать непрерывное пространство или время на конечные интервалы и выразить изменение функций в виде разностей между значениями в различных точках или моментах времени.

Основным преимуществом разностных уравнений является возможность их программной реализации и решение при помощи численных методов. Это позволяет исследовать сложные процессы и проводить численные эксперименты для анализа различных сценариев. Разностные уравнения позволяют моделировать системы с дискретными состояниями или событиями, которые не могут быть описаны дифференциальными уравнениями. Отличительной особенностью разностных уравнений является возможность учитывать различные виды граничных условий и ограничений, что делает их гибкими инструментами для моделирования различных систем. Например, при моделировании распространения тепла в материале можно учесть различные температурные граничные условия на его поверхности. Однако, следует отметить, что применение разностных уравнений требует определенных навыков в численных методах и программировании. Неправильное выбор метода или шага дискретизации может привести к неточным результатам или неустойчивым решениям. Поэтому важно проводить анализ устойчивости и сходимости разностных схем перед использованием их для моделирования.[1]

Практическое применение разностных уравнений в математическом моделировании весьма разнообразно и встречается в различных областях науки и инженерии. Ниже мы рассмотрим несколько примеров применения разностных уравнений.

## *1. Моделирование физических процессов.*

Физические процессы являются основой для понимания и описания различных явлений в нашем мире. Они могут быть сложными и динамическими, требующими точных математических моделей для их анализа и предсказания. Одним из способов моделирования физических процессов является использование разностных уравнений.

Разностные уравнения представляют собой численные методы для аппроксимации дифференциальных уравнений, которые описывают физические явления. Они позволяют представить непрерывное изменение значений во времени в дискретной форме, разбивая время на маленькие интервалы и вычисляя значения на этих интервалах.

Например, для моделирования теплопроводности в материале можно использовать разностные уравнения, основанные на законе Фурье. Разностные



уравнения позволяют вычислить распределение температуры в пространстве и времени, учитывая тепловые потоки и свойства материала. Это позволяет предсказать изменение температуры в различных точках и моментах времени, что имеет большое значение для проектирования и оптимизации систем отопления и охлаждения.[2]

В гидродинамике разностные уравнения могут быть использованы для моделирования движения жидкостей и газов. Они позволяют учесть законы сохранения массы, импульса и энергии, а также физические свойства среды. Моделирование различных гидродинамических процессов, таких как обтекание тела воздухом или движение волн на поверхности воды, может быть выполнено с использованием разностных уравнений. Это позволяет предсказать скорости, давления и другие параметры, необходимые для анализа и проектирования соответствующих систем и устройств.[2]

Однако, при использовании разностных уравнений для моделирования физических процессов необходимо учитывать их ограничения. Одно из основных ограничений — это точность аппроксимации. Чем более мелкими интервалами времени и пространства мы разбиваем систему, тем более точные результаты мы получим, но при этом увеличивается вычислительная сложность модели. Также, разностные уравнения могут быть чувствительны к неустойчивости и шумам в данных, что может привести к неточным результатам.

## *2. Финансовое моделирование.*

Финансовые рынки являются сложными и динамичными системами, где цены активов и инструментов постоянно изменяются. Для анализа и прогнозирования этих изменений используется финансовое моделирование. Одним из методов финансового моделирования является использование разностных уравнений.

Разностные уравнения позволяют выразить изменение значений финансовых переменных в дискретной форме, разбивая время на маленькие интервалы. Они могут быть применены для моделирования различных финансовых процессов, таких как цены акций, волатильность, процентные ставки и другие.

Одним из наиболее широко используемых разностных уравнений в финансовом моделировании является уравнение Блэка-Шоулза. Это уравнение позволяет оценить цену опциона, основываясь на различных параметрах, таких как цена базового актива, ставка безрисковой процентной ставки, волатильность и время до истечения опциона. Решение уравнения Блэка-Шоулза позволяет определить оптимальную цену опциона и стратегию его покупки или продажи.

Кроме того, разностные уравнения могут быть использованы для моделирования финансовых временных рядов. Временные ряды представляют собой последовательность значений финансовых переменных во времени. Используя разностные уравнения, можно вычислить следующее значение переменной на основе предыдущих значений и других факторов. Это позволяет предсказывать будущие значения и анализировать тренды и цикличность во временных рядах.[3]

При использовании разностных уравнений для финансового моделирования необходимо учитывать их ограничения. Во-первых, точность моделирования зависит от правильного выбора параметров и предположений. Неправильные предположения могут привести к неточным результатам. Во-вторых, разностные уравнения могут быть чувствительны к изменениям входных данных, таких как цены активов или ставки процента. Это может привести к неустойчивости модели и неверным прогнозам.

### 3. Экологическое моделирование.

Экологические системы представляют собой сложные и взаимосвязанные сети, где происходят различные процессы и взаимодействия между биологическими, физическими и химическими компонентами. Для анализа и прогнозирования поведения и изменений в экологических системах часто используется экологическое моделирование. Одним из методов моделирования экологических систем является использование разностных уравнений.

Разностные уравнения позволяют описать изменение значений экологических переменных в дискретной форме, разбивая время на маленькие интервалы. Они могут быть применены для моделирования различных экологических процессов, таких как популяционная динамика, распространение веществ и энергии, изменение климата и другие.

Одним из наиболее распространенных разностных уравнений в экологическом моделировании является уравнение Лотки-Вольтерра. Это уравнение используется для моделирования взаимодействия между популяциями хищников и жертв. Уравнение Лотки-Вольтерра позволяет определить изменение численности популяций во времени и учесть влияние взаимодействия на динамику популяций.

Кроме того, разностные уравнения могут быть использованы для моделирования экологических временных рядов. Временные ряды представляют собой последовательность значений экологических переменных во времени. Используя разностные уравнения, можно вычислить следующее значение переменной на основе предыдущих значений и других факторов. Это позволяет предсказывать будущие значения и анализировать тренды и цикличность в экологических временных рядах.[4]

Для экологического моделирования необходимо учитывать ограничения разностных уравнений, поскольку точность моделирования зависит от правильного выбора параметров и предположений. Неправильные предположения могут привести к неточным результатам. Помимо этого, разностные уравнения могут быть чувствительны к изменениям входных данных, таких как изменение климата или воздействие человеческой деятельности. Это может привести к нестабильности модели и неверным прогнозам.

В заключение отметим, что разностные уравнения предоставляют мощный инструмент для численного решения сложных задач и анализа различных сценариев. Их практическое применение в различных областях науки, техники и экономики позволяет получить более глубокое понимание процессов и явлений, а также принимать обоснованные решения на основе численных данных и экспериментов.

### Список литературы

1. Акулов С.М., Шаймарданов И.И. Математическое моделирование динамических систем. *Journal of Mathematical Sciences*. 2015. Т. 204. № 1. С.118–143. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10958-015-2624-5>
2. Белоусов А.А. Методы численного решения дифференциальных уравнений. Наука, 2005. 312 с.
3. Голуб Б., Ван Лоан Ч. Матричные вычисления. М.: Мир, 1999. 740 с.
4. Горбачук В.И., Чепьжер Л.М., Шкаликков А.А. Численные методы анализа и математического моделирования динамических систем. М.: Бином, 2010. 440 с.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ УРАВНЕНИЯ ВИНЕРА-ХОПФА В СППР ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

О.Д. Бибиков, О.Р. Волкова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: (+7 926)246-90-17, e-mail: bibikov2112@gmail.com,

Тел.: (+7 916)226-54-77, e-mail: orvsan@gmail.com

**Аннотация:** В статье приведены особенности применения метода статистической идентификации объектов на базе уравнения Винера-Хопфа в диагностических системах.

**Ключевые слова:** динамическая система, цифровые двойники, диагностические системы, идентификация, моделирование, уравнение Винера-Хопфа, искусственный интеллект, Индустрия 4.0

Развитие и создание базиса технологий, поддерживающих и ускоряющих появление четвертой промышленной революции (также известной как Индустрия 4.0) является одним из приоритетных направлений развития науки и техники на территории РФ.

Одной из важнейших технологий этого направления является технология использования цифровых двойников, т.к. они позволяют создавать точные (до 5% погрешности) модели объектов реального мира и проводить всесторонний анализ, направленный на повышение эффективности работы и оперативное устранение неисправностей в случае применения в диагностических системах реального времени.

Цифровые двойники бывают 3 видов:

- прототип (DTP) – представляет собой виртуальный аналог реального объекта, который содержит все данные для производства оригинала;
- экземпляр (DTI) – содержит данные обо всех характеристиках и эксплуатации физического объекта, включая трехмерную модель, и действует параллельно с оригиналом;
- агрегированный двойник (DTA) – вычислительная система из цифровых двойников и реальных объектов, которыми можно управлять из единого центра и обмениваться данными внутри.

В случае применения цифровых двойников в диагностических системах наибольший интерес представляют DTI и DTA, позволяющие с их помощью получить приближенную к реальности аналитическую информацию касательно объекта исследования.

Так или иначе перед процессом создания цифрового двойника, необходимо провести исследование объекта с целью его идентификации (в широком смысле) и построения математической модели, отвечающей заданным требованиям к точности протекающих внутри объекта физических процессов. Для этого необходимо воспроизвести все процессы и характеристики присущие объекту. Но так как объекты реального мира находятся далеко не в идеальных условиях, в ходе создания

математической модели необходимо применять различные математические методы позволяющие учитывать различные погрешности и шумы, возникающие в ходе анализа.

Одним из таких методов является идентификация объектов, базирующаяся на применении Винеровского подхода [1]: когда объекты реального мира, реализующие внутри себя различные динамические процессы, могут быть представлены прикладным классом динамических системы типа «вход-выход»:

$$y(t) = \sum_{j=1}^{\infty} G_j[h_j, x(t)], \quad (1)$$

где  $G_j[h_j, x(t)]$  – ортогональный функционал Винера порядка  $j$ ,

$h_j(t, \tau_1, \dots, \tau_j)$  – ядро функционала Винера порядка  $j$ .

Стоит отметить, что подобные системы допускают активный эксперимент в условиях неопределенности (отсутствие полных априорных данных о работе самой системы внутри) [2, 3].

При классическом подходе процесс идентификации осуществляется в соответствии со схемой представленной на рисунке 1.

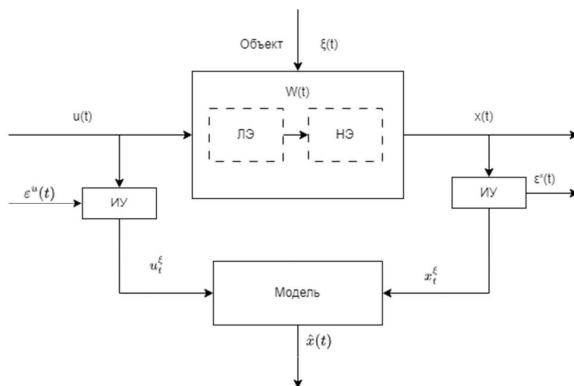


Рис. 1. Общая схема идентификации системы класса Винера

При этом реальный объект (некая исследуемая система), представляемый в виде комбинации двух элементов: линейной динамической (ЛЭ), которая находится в условиях непараметрической неопределенности, и нелинейной статической (НЭ) частей. Измерительные устройства (ИУ) фиксируют возмущение  $u(t)$ , действующее на объект, и наблюдаемую реакцию  $x(t)$  на поступившее возмущение. При этом существуют: ненаблюдаемое случайное воздействие на саму систему  $\xi(t)$ ,  $\varepsilon^u(t)$ ,  $\varepsilon^x(t)$  – случайные факторы, действующие в каналах измерения переменных в дискретные моменты времени  $t$ , так называемые шумы. Исходными данными для построения модели состояния исследуемого объекта представляют собой выборку измерений реакции объекта на возмущение  $u(t)$ :  $\{u_t^\xi, x_t^\xi, t = \overline{1, S}\}$ , а  $\hat{x}(t)$  – выход модели объекта пригодный для последующего анализа.  $w(t)$  – выход промежуточного звена объекта (неизмеримый).

Основной целью задачи идентификации является определение импульсной переходной функции по известному входному и выходному сигналу. Импульсная переходная функция как раз таки и позволяет прогнозировать поведение системы на тот или иной входной сигнал путём свёртки входного сигнала  $u(t)$  и полученной импульсной характеристики системы  $g(t)$

Данный метод обладает некоторыми особенностями, ограничивающие его применимость в динамических системах, коими является большинство известных систем. Метод Винера-Хопфа крайне чувствителен к различным аномалиям данных, что требует предварительной фильтрации тестирующей выборки возмущающего воздействия [2, 4, 5].

Также следует отметить высокую вычислительную сложность, так как в случае вычисления импульсных характеристик системы  $g(t)$  (также называемых ядром функционала Винера) с повышением порядка, многократно увеличивается количество операций. Также с повышением порядка увеличивается и возможность появления ошибок. Наиболее критичными являются ошибки задания самого функционала и ошибки процесса вычисления ядер диагностируемой системы [5-7].

Ошибка задания функционала вызвана нарушением ортогональности  $G_n$  при построении моделей с помощью взаимно-корреляционного метода идентификации (1). Так как корректный вид (2) функционалы принимают исключительно при подаче на вход идеального «белого шума». А базовая реализация Метод Винера-Хопфа предполагает, что процессы шумов и сигналов являются стационарными по своей природе и имеют измеримые статистические характеристики. В реальности же эти условия могут быть трудно выполнимыми. Так как статистические характеристики того же шума могут изменяться в течении времени и в зависимости от различных внешних условий.

$$g_k(a_1, \dots, a_k) = \frac{1}{k! A^k} M[y(t)G_k[h_k, x(t)]], \quad (2)$$

где  $M[\ ]$  – операция вычисления математического ожидания по времени;

$A$  – интенсивность «белого» гауссовского шума.

В (2) ядро  $h_k$  зависит от  $k$  параметров:

$$h_k(\tau_1 - \alpha_1, \dots, \tau_k - \alpha_k) = \delta(\tau_1 - \alpha_1) \dots \delta(\tau_k - \alpha_k).$$

В случае решения ряда сложностей, связанных с особенностями применения метода, в частности сложности получения идеального «белого шума» относительно входного сигнал, точность метода будет повышена, что значительно расширит область его применимости, а также повысит точность прогнозирования.

На данный момент для решения проблемы «белого шума» часто применяются различные фильтры [8], среди которых есть достаточно простые в реализации, такие как медианный фильтр, фильтр экспоненциальное бегущее среднее с адаптивным коэффициентом, средний арифметический и фильтр Калмана, так и сложные фильтры, такие как Вейвлет-преобразования и оптимальные фильтры Винера второго порядка предложенные в [9].

Также одним из возможных способов решения может быть применение нейронной сети, корректирующей свои веса сравнивая погрешности вычисления полученного (измеренного) и предполагаемого (рассчитанного путём свёртки входного сигнала  $u(t)$  и полученной импульсной характеристики системы  $g(t)$  значения выходного сигнала системы.

### Список литературы

1. Винер Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов. – М. Изд-во иностранной литературы, 1961 – 159с.
2. Волков Н.В. Функциональные ряды в задачах динамики автоматизированных систем. М.: Янус-К., 2001. – 100 с.
3. Коплярова Надежда Владимировна Алгоритм идентификации систем класса Винера // Сибирский аэрокосмический журнал. 2014. №5 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-identifikatsii-sistem-klassa-vinera> (дата обращения: 06.12.2023). <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-identifikatsii-sistem-klassa-vinera/>.
4. Ли Ю.В., Шетцен М. Определение ядер Винера-Хопфа для нелинейных систем методом взаимной корреляции. В сб. Техническая кибернетика за рубежом. М.: Машиностроение, 1968. – 278 с.
5. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. М.: Энергия, 1979. – 240 с.
6. Волкова О.Р., Саркисова И.О. «Ошибки, оказывающие влияние на процедуру идентификации и моделирования диагностируемой системы» // Международный научно-исследовательский журнал. г. Екатеринбург: ООО "Компания ПОЛИГРАФИСТ" — 2016. — № 12 (54) Часть 3. – С. 58–61. DOI: 10.18454/IRJ.2016.54.114.
7. Волкова О.Р. «Влияние статистических характеристик тестирующих процессов на результат идентификации исследуемой системы» // XVI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире» 14.12. 2016, г. Санкт-Петербург, Россия – СПб.: ИИУНЦ, 2016, – С.70-75.
8. Волков Н.В., Волкова О.Р. «Применение внешнего описания для конструирования динамических моделей технических систем», Вестник МГТУ «СТАНКИН». Научный рецензируемый журнал. М.: МГТУ «СТАНКИН», №2(2), 2008, С.96-107.
9. Цибизова Т.Ю. Идентификация нелинейных систем автоматического управления при помощи фильтров Вольтерра // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-14. – С. 3070-3074; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37693> (дата обращения: 07.12.2023).

# МЕТОДИКА КЛАСТЕРИЗАЦИИ СУБЪЕКТОВ РФ В ЦЕЛЯХ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Е.И. Боброва, И.В. Вякина**

Тверской государственной технической университет; Тверь, Российская федерация,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22  
[EBobrova\\_tstu@mail.ru](mailto:EBobrova_tstu@mail.ru)

Тверской государственной технической университет; Тверь, Российская федерация,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22  
[ivyakina@yahoo.com](mailto:ivyakina@yahoo.com)

Для оценки эффективности регионального управления качеством окружающей среды была разработана и апробирована методика кластеризации всех регионов РФ в соответствии с исходными показателями качества окружающей среды. Анализ эффективности региональных органов власти является особенно актуальным в контексте организации системы стратегического планирования, как на региональном [1], так и на муниципальном уровне. Кластеризация проводится на основе показателя «Качество окружающей среды», состоящего из нескольких входящих в него разнонаправленных индикаторов. Этот показатель рассчитывается Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации в целом по Российской Федерации и по субъектам Российской Федерации. К сожалению, полный объем необходимых исходных данных для расчёта показателя в открытом доступе публикуется, публикуется только итоговое значение показателя в виде динамики при сравнении отчётного и предыдущего периодов.

Также возникает вопрос о соизмеримости входящих в показатель индикаторов. Так, часть индикаторов характеризует темп роста соответствующего индекса, а ещё часть оценивает степень выполнения плана. Тогда как современные тенденции смещаются в сторону оценки не столько динамики, сколько качества достижения целей [2,3].

Авторами предложена методика кластеризации регионов, на основе представленных в публичной методике индексов качества окружающей среды (качество атмосферного воздуха, степень загрязнения водных объектов, уровень обращения с отходами, уровень лесовосстановления). По показателю «Качество окружающей среды» все субъекты РФ предлагается разбить кластера: Кластер 3 - Высокая оценка качества окружающей среды, Кластер 2 - Средняя оценка качества окружающей среды, Кластер 1 - Низкая оценка качества окружающей среды. Кластеризация проводится по каждому из 4 индексов отдельно, затем производится соотнесение региона к итоговому кластеру.

В результате кластеризации к Кластеру 3 (Высокая оценка качества окружающей среды) было отнесено только 2 российских региона: Курганская и Сахалинская области, абсолютное большинство регионов (69) относятся к Кластеру 2 (Средняя оценка качества окружающей среды) и 14 регионов относятся к Кластеру 1 (Низкая оценка качества окружающей среды).

В дальнейшем в рамках каждого кластера появляется возможность оценить эффективность деятельность органов региональной власти в области управления экологической сферой региона. Причём проанализировать эффективность управления можно не только в рамках итогового кластера региона, но и по каждому из входящих в агрегированный показатель индексов.

Разработанная авторами методика кластеризации российских регионов в целях анализа эффективности регионального управления качеством окружающей среды позволяет объективно оценить результативность действий органов государственной власти в достижении более высоких показателей уровня качества жизни населения, которые невозможны при отсутствии благоприятной экологической ситуации. При этом методика позволяет не сравнивать между собой регионы, изначально кардинально отличающиеся уровнем экологической обстановки.

#### **Список литературы**

1. Колонских, Л.Р. Совершенствование системы показателей оценки эффективности деятельности органов исполнительной власти российских нефтегазовых регионов // Экономика и управление: научно-практический журнал. – 2022. – № 5(167). – С. 121-127.
2. Казанцев, С. В. Оценка достижения стратегических целей Российской Федерации (2000-2019 гг.) // Экономическая безопасность. – 2021. – Т. 4, № 4. – С. 889-904.
3. Бенц, Д. С. Эффективность пространственного развития территории как индикатор оценки деятельности региональной власти: кейс Челябинской области // Управленец. – 2021. – Т. 12, № 6. – С. 49-66.



## ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ПОТОКОВ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Е.А. Бувич, О.Э. Яремко

МГТУ “СТАНКИН”, Москва, Россия

127055, Вадковский пер., 3а

Tel.: (+7 499) 972-42-55, email: gftregs@gmail.com

В [1] была предложена модель вычислительной системы (ВС) в виде системы дифференциальных уравнений. Приведем ее здесь в измененном виде, чтобы учесть возможный простой части вычислительных ядер:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = s_{nom} * w_1(N) - l_S(N) - l_D(N, D_a', D_b) \\ \frac{dD_a}{dt} = f(S') \\ \frac{dN}{dt} = I'(w, t) - H'(N, S', \bar{y}) \end{array} \right. \quad (1)$$

где:

$S$  – число доступных вычислительных тактов в системе в целом,

$s_{nom}$  – номинальная частота одного ядра,

$w_1(N)$  – число задействованных физических ядер,

$l_S$  – потери на организацию работы ВС,

$l_D$  – потери на недоступности нужных данных,

$D_a$  – объем доступов к данным, используемый программой,

$D_b$  – общий объем данных, потенциально используемый программой,

$N$  – число потоков в системе,

$H$  – число завершенных потоков,

$I(w, t)$  – модель нагрузки, порождающая потоки,

$D_a', S', H', I'$  – первые производные соответствующих величин по времени.

Определим  $w_1(N)$  как  $w_1(N) = \begin{cases} N, N \leq y_c \\ y_c, N > y_c \end{cases}$ , где  $y_c$  – число физических вычислительных ядер. Найдем, от чего зависит пропускная способность подобной системы. Предположим, что существует соответствующий ей стационарный режим, в котором  $\frac{dN}{dt} = 0$ . Сделав допущение, что  $N$  достаточно велико, примем, что процессы распределены равномерно по степени выполнения (что должно быть верно для стационарного режима и стационарного входного потока), тогда  $D_a' = D_a * S' / S_{a0}$  и  $H' = S' / S_{a0}$ , где  $D_a'$  – среднее число доступов к данным в единицу времени,  $S_{a0}$  – число тактов CPU нужное для выполнения программы без учета задержек. Поиск пропускной способности  $H'$  сводится к поиску максимума первого уравнения системы.

Исследуем  $I_S$ . Переключение процесса может быть вызвано различными причинами.

1. Переключение процессов операционной системой.

- a. Вытесняющая многозадачность. Переключения выполняются с некоторой периодичностью, когда число потоков превышает число логических ядер CPU. Назовем такое переключение спонтанным, т.к. код, выполняемый в это время, заранее неизвестен.

$$I_{S1a} = L_{SO} * \frac{w_2(N)}{q} \quad (2)$$

где  $q$  – размер кванта времени ОС,  $w_2(N)$  – число потоков, доступных для переключения в пределах системы,  $L_{SO}$  – затраты на переключение потока операционной системой.

- b. Использование "ожидającego" вызова ядра ОС в программе для получения данных извне либо синхронизации. Переключение связано с определенной точкой программы, назовем такой тип переключений прогнозируемым. Обозначим число подобных событий как  $C_h$ .

$$I_{S1b} = L_{SO} * C_h * \frac{S'}{S^*} \quad (3)$$

где  $S^*$  - вычислительная сложность исполняемого кода, которая зависит от того, что именно описывает модель. Для задачи найти пропускную способность заданного кода и оборудования (сервер или моделирование в реальном времени)  $S^* = S_{a0}$ . Для задачи найти оптимальное количество параллельных потоков для выполнения заданного объема вычислений (сетка численных методов)  $S^* = S_{a0}/N$ .

- c. Аппаратный отказ страницы, в частности если  $D_b$  больше объема оперативной памяти. Переключение спонтанное.

$$I_{S1c} = L_{SO} * D'_a * p_{Ldisk} \quad (4)$$

где  $p_{Ln}$  – здесь и далее вероятность нахождения данных на указанном уровне иерархии хранения.

2. Потоки пространства пользователя ("зеленые потоки", корутины, вычислительные блоки), когда в рамках одного потока операционной системы реализуется несколько логических потоков, обычно управляемых потоком данных. Переключение прогнозируемое, является оптимизацией случая 1b, так как требует меньше процессорного времени, обозначим эту величину  $L_{SG}$ . По аналогии с (3):

$$I_{S2} = L_{SG} * C_h * \frac{S'}{S^*} \quad (5)$$

3. Переключение потоков внутри процессора. Доступно только для некоторого подмножества потоков, уже имеющихся внутри физического ядра. Такое переключение не требует выполнения кода, т.к. с точки зрения операционной системы оба потока уже выполняются.  $L_{S3} = 0$ . Переключения спонтанные.

Объединив формулы (2),(3),(4) и (5), получим универсальное выражение для потерь на переключение потоков:

$$l_s = L_{so} * \left( \frac{w_2(N_{OS})}{q} + D'_A * p_{Ldisk} \right) + L_{sp} * C_h * \frac{S'}{S^*} \quad (6)$$

$$w_2(N_{OS}) = \begin{cases} 0, N_{OS} \leq y_l \\ \frac{N_{OS}}{y_c} - 1, y_l < N_{OS} < 2y_l \\ 1, N_{OS} \geq 2y_l \end{cases}$$

где:  $N_{OS}$  – число потоков уровня операционной системы,  $L_{sp}$  – затраты на прогнозируемое переключение,  $y_l$  – число логических ядер,  $y_l \geq y_c$ . Для основанной на потоках ОС многозадачности  $L_{sp} = L_{so}$ ,  $N_{OS} = N$ .

Для удобства записи представим сумму задержек доступа к памяти из [1] как

$$\widetilde{L}_D(D_b, P_L, w_3(N)) = \sum_{i=0}^{\frac{L_{A_i}}{w_3(N)}} \sum_{j=0}^{lv(D_b)} p_{L_i} p_0(j) (L_{A_i} - j * w_3(N)) \quad (7)$$

$$l_D = D_a * \widetilde{L}_D * \frac{S'}{S_{a0}}$$

где:  $p_0$  – плотность распределения предсказуемости ссылок,  $w_3(N)$  – количество потоков, выполняющихся на физическом ядре. Тогда первое уравнение системы можно переписать как:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{S^* S_{a0}}{S^* S_{a0} + S_{a0} L_{sp} C_h + S^* D_a \widetilde{L}_D} * \left( s_{nom} * w_1(N_{OS}) - L_{so} \left( \frac{w_2(N_{OS})}{q} + D'_A * p_{Ldisk} \right) \right) \quad (8)$$

Используя для  $S^*$  величины  $S_{a0}$  или  $S_{a0}/N$ , получаем модели соответственно для постоянного или разделенного между потоками объема вычислений.

Если допустить, что  $p_{Ldisk} = 0$ , а также, что  $w_3(N)$  тождественно равна 1 (ядра не имеют одновременной многозадачности) и  $\widetilde{L}_D$  таким образом не зависит от  $N$ , то модель имеет максимальную пропускную способность при  $N = y_c$  в обоих случаях раскрытия  $S^*$  (так как  $C_h$  неотрицательна, а остальные величины положительны) и соответствует в этом многоканальной системе массового обслуживания.

Но в экспериментах часто можно наблюдать  $N < y_c$  для подобных условий. В [2] показано, что потеря тактов при переключении потоков также зависит от объема их работы с памятью, что связано с конкуренцией за различные уровни системы хранения.

Наиболее простым фактором является общее увеличение количества данных. Суммарный объем, потенциально востребованный  $N$  экземплярами программы, можно определить как  $D_b(N) = D_{bsh} + N * D_{bp}$ , где  $D_{bsh}$  – разделяемый объем,  $D_{bp}$  – приватный для каждого потока объем. В случае, если все данные разделяемые, этот фактор не окажет влияния.

Более сложным является вытеснение данных потока на медленные уровни хранения. Рассмотрим этот процесс для инклюзивных кешей. Добавим характеристику  $D_c$  – это объем данных, к которым выполняются обращения в процессе работы или пространственная сложность алгоритма ( $D_a \geq D_c$ ). Аналогично  $D_b$  ее можно

представить как  $D_c(N) = D_{csh} + N * D_{cp}$ . Программа в процессе работы выполняет  $D_a - D_c(1)$  повторных обращений к памяти. Обозначим количество уникальных обращений в единицу времени как  $D'_u = f(D'_a, D_a, D_c)$ , количество данных потока при  $N=1$  на определенном уровне памяти как  $M_{bi} = \min(V_i, D_c)$ .

Разделение уровня хранения между несколькими потоками приводит к двум противоположно направленным процессам – вытеснению данных конкретного потока со скоростью  $D'_u * \frac{N-1}{N}$  на более низкие уровни и восстановлению их на естественных для монопольного выполнения уровнях со скоростью  $D'_u/N$ . Обозначив количество данных на заданном уровне как  $M_i$ , решим получившееся уравнение

$$\frac{dM_i}{dt} = \frac{(M_{bi} - M_i)/M_{bi} * D'_u - M_i/V_i * D'_u * (N - 1)}{N}, M_i(0) = 0 \quad (9)$$

получим для уровней  $0 \leq i < \text{lvl}(D_c(N))$  ожидаемый результат

$$M_i = \frac{M_{bi}}{N} * (1 - e^{-D_u}) \approx M_{bi} * \frac{1}{N} \quad (10)$$

и, аналогично, для  $i = \text{lvl}(D_c(N))$

$$M_i \approx M_{bi} * \frac{V_i}{V_i + M_b * (N - 1)} \quad (11)$$

где:  $\text{lvl}(x)$  – ступенчатая неубывающая функция, определяющая минимально возможный уровень хранения указанного объема данных,  $V_i$  – объем указанного уровня памяти. С учетом полученных соотношений  $k_i = M_i/M_{bi}$  можно составить верхнюю треугольную стохастическую матрицу  $T$  перераспределения данных по уровням иерархии размерности  $\text{lvl}(D_b(N))$ , удовлетворяющую условиям:

$$\forall i, \sum_j T_{ji} V_j = k_i V_i, \sum_j T_{ij} = 1, T_{00} = k_0 \quad (12)$$

Для инклюзивной иерархии приоритет имеют данные, вытесненные с более быстрых уровней. Каждый столбец, начиная со второго, заполняется сверху вниз – пытаемся дополнить первую строку до 1, потом, если результат не нарушает условие для столбца, переходим к следующей строке, если нарушает - уменьшаем его до соблюдения условия и переходим к следующему столбцу. Алгоритм составления  $T$  для различных способов организации памяти требует отдельного исследования. Очевидно, что мы получим набор разных матриц  $T_1, T_2, \dots$  для различных диапазонов  $N$ , границы которых будут в случае инклюзивной иерархии определяться уравнениями вида  $(N - 1) * V_i = V_{i+1}$ . Соответственно вероятности нахождения данных на различных уровнях примут вид

$$P_L^*(N) = P_L * T_{i(N)} \quad (13)$$

Важным свойством этого набора матриц будет то, что  $M[P_L * T_i] < M[P_L * T_{i+1}]$ , т.к. данные могут перемещаться только на более медленные уровни хранения. Также можно утверждать что  $M[P_L^*(N_1)] \leq M[P_L^*(N_2)]$  если  $N_1 < N_2$  внутри каждого диапазона, соответствующего определенной матрице. Таким образом  $I_D(N)$  будет возрастать при  $N > y_L$ , с учётом полученного ранее результата (6) для  $I_S$ , можно сказать, что максимальная пропускная способность ВС достигается при  $N \leq y_L$ . Однако это может быть неверно для часто встречающегося случая последовательно

соединенных ВС, когда одна из них вынуждена ожидать результат работы другой для продолжения своих вычислений. Такому описанию соответствуют, например, информационные системы из двух и более уровней. Поведение ВС с ожиданием в этом случае требует дополнительного исследования.

Не все обращения к памяти будут объектом вытеснения, описанного формулой (13). Это можно представить с помощью  $K_r$  – доле обращений к памяти, не затронутых этим эффектом:

$$l_D = D'_a * (K_r * \bar{L}_D(D_b(N), P_L, w_3(N)) + (1 - K_r) * \bar{L}_D(D_b(N), P_L^*, w_3(N))) \quad (14)$$

Для спонтанных переключений точное вычисление  $K_r$  близко к проблеме, рассмотренной в [3], но описанное в ней распределение времени повторного доступа к данным должно с какой-то степенью точности воспроизводиться используемым в модели распределением  $P_L$ , которое легко получить с помощью профилировщика. Эта возможность требует дополнительного исследования.

Для прогнозируемых переключений величиной  $K_r$  можно управлять, руководствуясь следующим соображением: если блок кода между получением и потерей потока CPU имеет пространственную сложность  $D_{cc}$ , но его выходные данные, которые и будут объектом последующего вытеснения, имеют объем  $D_{out}$ , то  $K_r = (D_{cc} - D_{out})/D_{cc}$ . При этом  $D_{cc}$  для разделенного объема вычислений в общем случае будет зависеть от  $N$  как  $D_{cc}(N) = const * D_c/N$ , где  $const$  – некоторая константа, характерная для используемого алгоритма. Это нужно учитывать при поиске оптимального режима некоторых параллельных вычислений, например, для описанного в работе [4] умножения больших матриц.

Возможность управления  $K_r$  позволяет выделить класс ВС, производительность которых максимальна при  $N \geq y_1$  и не зависит от  $N$  в этом диапазоне. Такие системы должны обладать всеми следующими свойствами:

- отсутствие спонтанных переключений (асинхронная многозадачность, отсутствие аппаратных отказов страниц,  $N_{OS} \leq y_c, y_l = y_c$ )
- $D_b(N) = D_{bsh}$  – исходные данные разделены между всеми потоками.
- $K_r=1, D_{out}=0$  – это возможно, например, если переключение вызвано ожиданием ответа, в котором будут все данные для продолжения работы.

**Выводы:** в работе показано, что в ВС без ожидания внешних вычислений пропускная способность достигается при числе потоков меньшем или равном числу логических вычислительных ядер. Выделены такие параметры ВС, как интенсивность работы с памятью и уменьшение объема данных внутри асинхронного блока вычислений, влияющие на зависимость ее производительности от числа потоков. Выделен класс ВС, в которых число потоков не влияет на производительность.

### Список литературы

1. Буевич Е.А., Яремко О.Э. Особенности моделирования многозадачных вычислительных систем как систем массового обслуживания. Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике, ПГУ, г. Пенза, 2023
2. Chuanpeng Li; Chen Ding; Kai Shen. Quantifying The Cost of Context Switch. ACM Federated Computing Research Conference, San Diego, 13-14 June 2007
3. P. J. Denning, Thrashing: Its causes and prevention. Proc. AFIPS Fall Joint Computer Conference 33. Thompson, 1968, pp. 915-922
4. Арыков С. Б. Асинхронное программирование численных задач. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2010): труды международной научной конференции (Уфа, 29 марта-2 апреля 2010 г.). Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. — 2010

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПП ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ FUZZDIAG

Бу Тунг Лам, О.Р. Волкова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: (+7 996) 719-32-44, e-mail: lamvu847@gmail.com,

Тел.: (+7 916) 226-54-77, e-mail: orvsan@gmail.com

**Аннотация:** Основная цель данной работы является использование нечеткой логики, для решения опроса с неопределенностью при диагностике традиционной вьетнамской медицины. В работе предложен усовершенствованный механизм логического вывода, разрабатываемой рекомендательной системы FuzzDIAG, построенного на принципе нечеткой логики Max-Min и объединяющей положительные и отрицательные знания при диагностике синдромов

**Ключевые слова:** нечеткая экспертная система, принцип Max-Min, положительные и отрицательные знания, синдром, вьетнамская традиционная медицина.

Вьетнамская традиционная медицина (ВТМ) рассматривает организм человека как единую функциональную систему, каждая составляющая которой тесно связано с другими, взаимодействующую с окружающим нас миром.

В ее основе лежит диагностика, использующая четыре основных метода с помощью которых специалист при должной внимательности и опыте может получить полную информацию о здоровье, обратившегося за помощью человека. Для оценки текущего состояния человеческого организма используется комбинация интегральных параметров Инь и Ян, нарушение гармонии которых проявляется в нарушении циркуляции энергии Ци по основным энергетическим каналам [1-2].

Полученные во время диагностики нечеткие сведения или вербальные характеристики состояния обратившегося, обусловленные субъективностью оценки эмпирических данных и трудностью однозначной интерпретации клинических проявлений, порождают ошибки в диагностике восьми синдромов, что может привести в лучшем случае к бесполезному лечению.

В таких условиях неопределенности методы нечеткой логики оказалась мощным инструментом систем принятия решений, реализуемых в современных интеллектуальных системах для извлечения и распространения знаний.

### **База знаний экспертной системы FUZZDIAG.**

На основе данных национальной больницы традиционной медицины с помощью экспертов была разработана формальная структура, состоящая из конечного множества

пропозициональных переменных *Prof*, включающего в себя неповторяющиеся формализованные предложения о симптомах.

Правило экспертной рекомендательной системы является пропозициональной формулой следующего вида:

$$A \rightarrow S,$$

где *S* – утверждение, называемое выводом правила;

*A* – посылка правила, представленная как простое сочетание предложений, не содержащих *S*, т.е. сочетание положительных и отрицательных предложений из множества *Prof* (например:  $A_1 \wedge \bar{A}_2$ ).

Форма правила *B* – это комбинация правил без циклов, т.е. есть такой набор правил, что в нем нет такой последовательности законов  $R_0 \dots R_n$ , что заключение каждого закона  $R_i$  появляется в предположении закона  $R_{i+1}$  (при  $i < n$ ) и заключение закона  $R_n$  появляется в предположении закона  $R_0$ .

Все множество форм правил *B*, состоящее из всех предложений, фигурирующих в правилах, разделено на три отдельных подмножества:

*Ques* – представляет собой множество вопросов-предложений, которые не фигурируют в заключении правила.

*Goal* – это множество целей: предложения, которые не фигурируют в предпосылке правила *A*.

*Intermediate propositions* – множество промежуточных утверждений, которые встречается как в посылке, так и в заключении закона.

Разработка правил экспертной рекомендательной системы велась совместно с экспертами ВТМ с выделением всех симптомов, влияющие на проявление и постановку синдрома.

Каждой формы правила из множества *B* законом присваивается вес *w* (вероятность возникновения в том или ином синдроме). имеют вес:  $\theta(S|A) = k(A \rightarrow S) = w$ .

Основа правила  $\theta = (B, k)$  – закон построения утверждения, где отображением  $k: B \rightarrow G$

При этом анкета, заполняемая при обращении, представляет собой отображение  $q: Ques \rightarrow G$ .

### Механизм логического вывода СШП

Предварительная подготовка правил предполагала выполнение следующих операций над набором весов для распространения знаний:

- представления функций истинности логических соединений (общие таблицы истинности, операции отрицания NEG и комбинации CONJ).
- применение бинарного оператора CTR, который вычисляет вклад правила (часто называемый оценочной функцией *modus ponens*) из веса правила и веса предпосылки правила.
- применение бинарная операция  $\oplus$  для комбинации вкладов законов с одним и тем же выводом.

Общий вес формулы определяется набором вопросов *q* и вклад закона *R* рассчитывается со значениями *q* (определяется на основании закона  $\theta$  и действующей структуры весов) по следующему алгоритму:

Шаг 1.  $W_{(\theta, G)}(S|q) = q(S)$ .



Шаг 2.  $W_{(\theta,G)}(A \& B | q) = CONJ(W_{(\theta,G)}(A | q), |W_{(\theta,G)}(B | q))$

Шаг 3.  $W_{(\theta,G)}(\neg A | q) = NEG(W_{(\theta,G)}(A | q))$

На втором и третьем шаге используются таблицы истинности.

Шаг 4.  $V_{(\theta,G)}(R_1 | q) \oplus \dots \oplus V_{(\theta,G)}(R_n | q)$

Шаг 5.  $V_{(\theta,G)}(A \rightarrow S | q) = CTR(UW_{(\theta,G)}(A | q), k(A \rightarrow S))$ .

### Правила сочетания позитивного негативного знания

Большинство разрабатываемых экспертных систем используют принцип максимально-минимальной композиции правил нечеткой экспертной системы CADIAG-2 [3] и операции семенной системы MYCIN[4-6]. В случае с ВТМ применение этого принципа давало значительную погрешность при вынесении рекомендательного решения/ В качестве решения проблемы предлагается подход, который, сочетает положительные и отрицательные знания диагностической системы ВТМ.

Для реализации данного подхода введены следующие определения.

*Определение 1:*

Нечеткие данные о пациентах для пациентов  $P_q$  (*Patient*) для всех симптомов  $S_i$  при  $i = 1, \dots, m$  имеют степень непрозрачности  $\mu_{(R_{PS})}(P_q, S_i)$  и принимают значения в диапазоне  $[0,1]$ .

Если  $\mu_{(R_{PS})}(P_q, S_i) = 1$ , то это означает, что симптом  $S_i$  твердо продемонстрировать пациенту  $P_q$ .

Если  $\mu_{(R_{PS})}(P_q, S_i) = 0$ , то это означает, что симптом  $S_i$  категорически не показывать пациенту  $P_q$ .

Если  $0 < \mu_{(R_{PS})}(P_q, S_i) < 1$ , то это означает, что симптом  $S_i$  показать пациенту  $P_q$  до некоторой степени.

*Определение 2:*

Пусть имеется основная комбинация  $E_i$  симптомов  $S_i$  в виде  $E_i = S_1, \dots, S_m$ , определяемая для каждого  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ ):

$$\mu_{(R_{PS})}(P_q, E_i) = \min_{S_i \in E_i} (\mu_{(R_{PS})}(P_q, S_i))$$

В случае диагностики в традиционной восточной медицине для упрощения фактической ситуации было принято, что комбинация суждений первоначально не включает в себя отрицательных суждений.

*Определение 3:*

Основа права  $\theta$  задается значениями  $\mu_{R_{SD}}^c(E_i, D_j)$  и  $\mu_{R_{SD}}^e(E_i, D_j)$ , включая законы:

$$E_i \rightarrow D_j (\mu_{R_{SD}}^c(E_i, D_j))$$

$$E_i \rightarrow \neg D_j (\mu_{R_{SD}}^e(E_i, D_j))$$

Замечание: при условии, что  $\mu_{R_{SD}}^c(E_i, D_j) = 0$  или  $\mu_{R_{SD}}^e(E_i, D_j) = 0$ , где  $\mu_{R_{SD}}^c(E_i, D_j)$  и  $\mu_{R_{SD}}^e(E_i, D_j)$ , два разных нечетких веса нечетких правил в интервале  $[0,1]$ , очевидно, что комбинация симптомов в предпосылке не может одновременно подтверждать и опровергать заключение о болезни.

Следовательно, для утвердительных законов:

Если  $\mu_{R_{SD}}^c(E_i, D_j) = 0$ , то основную комбинацию  $E_q$  симптомов  $S_i$  исключить заключение о болезни  $D_j$ .

Если  $\mu_{R_{SD}}^c(E_i, D_j) = 1$ , то основную комбинацию  $E_q$  симптомов  $S_i$  подтвердить заключение о болезни  $D_j$ .

Если  $0 < \mu_{R_{SD}}^c(E_i, D_j) < 1$ , то основную комбинацию  $E_q$  симптомов  $S_i$  подтвердить заключение о болезни  $D_j$  с некоторой степенью непрозрачности.

Точно так же для правила отрицания у нас есть значения для случая, когда вывод о болезни исключен, следующим образом:

Если  $\mu_{R_{SD}}^e(E_i, D_j) = 0$ , то основную комбинацию  $E_q$  симптомов  $S_i$  подтвердить заключение о болезни  $D_j$ .

Если  $\mu_{R_{SD}}^e(E_i, D_j) = 1$ , то основную комбинацию  $E_q$  симптомов  $S_i$  исключить заключение о болезни  $D_j$ .

Если  $0 < \mu_{R_{SD}}^e(E_i, D_j) < 1$ , то означает основную комбинацию  $E_q$  симптомов  $S_i$  исключить заключение о болезни  $D_j$  с некоторой степенью непрозрачности.

Теперь перейдем к определению общей степени утверждения или отрицания диагноза как комбинации утвердительного и отрицательного.

Разницу в положительных и отрицательных степенях в смысле групповых операций для удобства представления будем использовать в диапазоне  $(-1, 1)$ .

*Определение 4:*

Учитывая данные пациента, общая степень подтверждения и отрицания вывода пациента  $D_j$  у пациента  $P_q$  с наблюдаемыми симптомами  $S_i$ :  $\mu_{R_{PD}}^c(P_i, D_j)$  и  $\mu_{R_{PD}}^e(P_i, D_j)$ /

В диапазоне  $[-1, 1]$

$$\mu_{R_{PD}}^c(P_q, D_j) = \text{Max}_{E'_q} \text{Min} [\mu_{(R_{PS})}(P_q, E'_i), \mu_{R_{SD}}^c(E'_i, D_j)],$$

$$\mu_{R_{PD}}^e(P_q, D_j) = \text{Max}_{E'_q} \text{Min} [\mu_{(R_{PS})}(P_q, E'_i), \mu_{R_{SD}}^e(E'_i, D_j)],$$

где  $\mu_{R_{PD}}^c(P_q, D_j)$ ,  $\mu_{R_{PD}}^e(P_q, D_j)$  принимают значение в  $[0, 1]$ .

Наконец, результаты диагностики в ВТМ определяются следующим образом:

Если результат  $\mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j) = 1$ , то необходимо подтвердить заключение по синдрому  $D_j$ .

Если результат  $\mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j)$  в пределах  $0.6 \leq \mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j) < 1$ , то заключение по синдрому  $D_j$  почти подтверждено.

Если результат  $\mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j)$  в пределах  $\varepsilon \leq \mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j) < 0.6$ , то заключение по синдрому  $D_j$  может быть подтверждено.

Если результат  $\mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j)$  в пределах  $-\varepsilon < \mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j) < \varepsilon$ , то заключение по синдрому  $D_j$  неизвестное утверждение, требующее уточнения и подтверждения.

Если результат  $\mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j)$  в пределах  $-0.6 < \mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j) \leq -\varepsilon$ , то заключение по синдрому  $D_j$  может быть исключено.

Если результат  $\mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j)$  в пределах  $-1 < \mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j) \leq -0.6$ , то заключение по синдрому  $D_j$  почти исключается.

Если результат  $\mu_{R_{PD}}^{\text{tot}}(P_q, D_j) = 1$ , то заключение по синдрому  $D_j$  должно быть исключено.

Параметр  $\varepsilon$  – эвристическое значение, зависящее от опыта эксперта (в рамках работы над базой знаний было принято, что  $\varepsilon = 0.2$ ).

### **Заключение.**

В работе приведены ключевые аспекты представления знаний ВТМ в условия неопределенности, в основу которых лежит подход основанные на дополнительном применении математического аппарата нечеткой логики над множеством, позволяющего учитывать не только положительный опыт применения знаний, но и отрицательный. На основе вышеописанного подхода разрабатывается СППР рекомендательной экспертной системы FuzzDIAG.

### **Список литературы**

1. Генри С. Лу, Китайские природные лекарства: традиционные методы лечения и профилактики, Черный собака & Издательство Левенталь, Inc. 1986.
2. Тран Ван Ки, Справочник по диагностике и лечению: Внутренняя народная медицина, Издатель Дананг, 2015. (на вьетнамском).
3. Адлассниг, К.-П., CADIAG-2: Компьютерная медицинская диагностика с использованием нечетких подмножеств. В Гупта, М.М. и Санче, Э. (редакторы). Приблизительное рассуждение в анализе решений, издательство North-Holland Publishing Company, Амстердам, 219–247. 1982.
4. Shortliffe E. H. Компьютерная медицинская консультация: MYCIN.. Нью-Йорк. 1976.
5. Беннетт, Дж.С. и Энгельмор, Р.С., Опыт использования EMYCIN в Rule-Based Systems, Buchanan, В., и Shortliffe, E. Eds. Аддисон-Уэсли, Реддинг, Массачусетс, 1984, 314.
6. Дэниел М., Хайек, П., Нгуен Хоанг Фуонг, CADIAG-2 and MYCIN - подобные системы, Международный журнал искусственного интеллекта в медицине, Эльзевир Наука, Vol. 9, 241-259, 1997.

# ОБ АППРОКСИМАЦИИ РЕАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ (СМО) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Е.А. Девятерикова

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1, edev-va@yandex.ru

Математические модели массового обслуживания находят широкое применение в задачах, возникающих при проектировании и анализе систем, состоящих из большого числа похожих по своим функциям элементов. К таким системам можно отнести, например, вычислительные системы, телекоммуникационные сети, АСУ, предприятия бытового обслуживания и многие другие. Адекватность модели определяется тем, насколько точно при заданных структурных, нагрузочных и функциональных параметрах она позволяет оценить характеристики эффективности работы реальной системы. Если структурные и функциональные параметры (количество каналов, накопителей, способ из взаимодействия, дисциплины буферизации и обслуживания) определить достаточно просто, то полная информация о нагрузочных параметрах (законы распределения интервалов времени между событиями во входящем потоке и времени обслуживания заявки) часто недоступна. Во многих случаях для оценки статистических показателей работы СМО в стационарном режиме эти законы знать необязательно, можно ограничиться оценкой средних значений и коэффициентов вариации распределений. Если этого недостаточно, то для аппроксимации реальных законов распределения в теории массового обслуживания чаще всего используют мультиэкспоненциальные распределения: Эрланга и гипоекспоненциальное, если коэффициент вариации меньше 1, или гиперэкспоненциальное, если коэффициент вариации больше 1.

В работе [1] для вероятностных распределений с коэффициентами вариации, отличными от единицы, получены математические зависимости для аппроксимации по двум заданным моментам распределения с использованием мультиэкспоненциальных распределений. Для двухфазного гиперэкспоненциального распределения параметры  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  вычисляются через оценки коэффициента вариации и среднего значения интервала времени между событиями в реальном потоке. Третий параметр  $q$  гиперэкспоненциального распределения предлагается выбрать из интервала  $q \leq \frac{2}{1+v^2}$ . В данной работе рассматриваются различные случаи выбора наиболее подходящего для конкретного исследования значения параметра  $q$ : проводится аппроксимация реального распределения с учетом его асимметрии и «тяжелых» хвостов; оценка параметра  $q$  строится на основе проверки гипотезы о близости теоретического и эмпирического распределений с использованием различных критериев или методом максимального правдоподобия. Проведено сравнение результатов с полученными в [1].

## Список литературы

1. Алиев Т.И. Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2(84). – С. 88–93

## ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ В ДВУСЛОЙНОЙ СРЕДЕ

В. С. Дрякина

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»  
127055, Вадковский пер. 3а  
Tel.: (+7 499)972-42-55, e-mail: [vadrvakina@yandex.ru](mailto:vadrvakina@yandex.ru)

**Ключевые слова:** вязкопластическое течение, пластическая деформация, двухслойная среда, модель Койна – Мессингера.

**Аннотация.** Предложена постановка задачи течения тонкого двухслойного пластического слоя, состоящего материалов с различными кинематическим свойствами. Предложен один из возможных методов решения такой задачи.

Теория пластического течения в двухслойной среде изучает поведение материалов, состоящих из двух слоев, которые имеют различные механические свойства, такие как прочность и текучесть. Эта теория находит свое применение в различных областях, включая строительство, геотехнику, металлургию и другие отрасли промышленности.

Для моделирования пластического течения в двухслойной среде используются различные математические модели и методы. Одной из самых распространенных моделей является модель Койна – Мессингера, которая учитывает различные механические свойства двух слоев и позволяет предсказать поведение материала при пластической деформации.

Рассмотрим модель двухслойной среды, состоящей из двух слоев с различными свойствами (рис. 1). В основе этой модели лежит предположение об однородности каждого отдельного слоя и непроницаемости границы между ними.

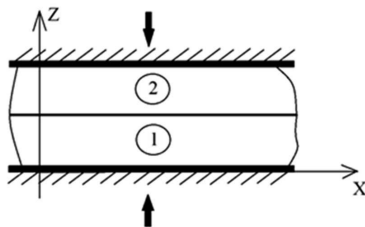


Рисунок 1. Двухслойная среда

Пусть первый слой имеет толщину  $d_1$  и имеет свойства  $c_1$  и плотность  $\rho_1$ , а второй слой имеет толщину  $d_2$  и свойства  $c_2$  и плотность  $\rho_2$ . Пусть скорость распространения волн в первом слое равна  $V_1$ , а во втором слое –  $V_2$ .

Волновое уравнение для волн в первом слое имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_1^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + V_1^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + V_1^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где  $u$  – компонента смещения волнового поля,  $x, y$  и  $z$  – координаты в пространстве, а

$t$  – время.

Волновое уравнение для волн во втором слое имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_2^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + V_2^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + V_2^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

Сформулируем граничные условия рассматриваемой задачи. На нижней границе пластического слоя потребуем выполнения двух условий (3):

$$u_1(0, t) = 0, \quad \frac{\partial u_1}{\partial x(0, t)} = 0. \quad (3)$$

Эти условия означают, что нижний край пластического слоя закреплен и не смещается.

На верхней границе пластического слоя потребуем выполнения условий (4):

$$u_2(l, t) = 0, \quad \frac{\partial u_2}{\partial x(l, t)} = 0. \quad (4)$$

Граничные условия на неизвестной свободной границе  $F(x, z, t) = 0$ , которая в начальный момент задается соотношением (5):

$$F(x, z, t_0) = l_0 - x = 0. \quad (5)$$

Эти условия говорят о том, что верхний край пластического слоя также закреплен. В точке перехода между слоями должны выполняться условия непрерывности компонент смещения и давления, а также условия равенства радиальных и тангенциальных напряжений.

Реализация поставленной задачи предполагает совместное решение уравнений (1) и (2) с учетом сформулированных граничных условий (3), (4), (5). Задачу можно рассматривать как квазистатическую при фиксированном или дискретно изменяющемся параметре  $t$ , который можно интерпретировать как время.

Пластическое течение в двуслойной среде обусловлено разницей в механических свойствах двух слоев. Если разница в прочности или текучести большая, то это может привести к образованию дополнительных напряжений и деформаций в материале, что может вызвать разрушение или нестабильность структуры.

Также влияние на пластическое течение в двуслойной среде может оказывать температура, скорость деформации, а также наличие других внешних нагрузок. Все эти факторы необходимо учитывать при проведении исследований и моделировании пластического течения в двуслойной среде.

### Список литературы:

1. Кийко И. А. Анизотропия в процессах течения тонкого пластического слоя // ПММ. – 2006. – Т.70. – Вып.2. – С.344–351.
2. Tim G. Myers Extension to the Messinger Model for Aircraft Icing / Tim G. Myers // AIAA JOURNAL. — 2021. — № 2. — С. 211-218.
3. В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская К вопросу об осадке пластического слоя с неоднородными свойствами по толщине / В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская // — 2023.
4. В.Я. Шкадов, З.Д. Запryanов. Течения вязкой жидкости / В.Я. Шкадов, З.Д. Запryanов — 2733. — Москва: Московский университет, 1984 — 200 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОКСЕЛЬНОЙ ГРАФИКИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ 3D ОБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А.С. Желнов

МГТУ “СТАНКИН”, Москва, Россия

127055, Вадковский переулок, 3а

Tel.: (+7 977)638-44-3, e-mail: [andreizhelnov21@gmail.com](mailto:andreizhelnov21@gmail.com)

### Аннотация:

Одним из ключевых вопросов при моделировании трехмерных объектов является способ представления данных. В настоящее время двумя основными способами являются отрисовка моделей с помощью плоских полигонов без внутреннего наполнения или с помощью вокселей, несущих в себе информацию, позволяющую заполнить объект изнутри, создавая более точные с физической точки зрения объекты. Однако, воксельные модели занимают больше места на носителях, чем те же полигоны, и обладают большей ресурсоемкостью для обработки.

С появлением больших хранилищ данных, распознавание и анализ трехмерных геометрических моделей является проблемой для исследований в области компьютерного зрения. Применение нейронных сетей в совокупности с воксельной графикой позволяет эффективно решать задачи распознавания.

В предложенной работе рассматривается использование вокселей для распознавания объектов методами искусственного интеллекта.

## APPLICATION OF VOXEL GRAPHICS FOR RECOGNIZING 3D OBJECTS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

A.S. Zhelnov

MSTU “STANKIN”, Moscow, Russia

127055, Vadkovskii lane, 3a

Tel.: (+7 977)638-44-3, e-mail: [andreizhelnov21@gmail.com](mailto:andreizhelnov21@gmail.com)

### Abstract:

One of the key issues in modeling 3D objects is the way data is represented. Currently, the two main methods are rendering models using flat polygons without internal filling or using voxels, which carry information that allows filling the object from the inside, creating more accurate objects from a physical point of view. However, voxel models take up more space on media than the same polygons and are more resource intensive to process.

With the advent of big data storage, recognizing and analyzing 3D geometric models is a challenge for computer vision research. The application of neural networks in conjunction with voxel graphics can effectively solve the recognition problems.

The proposed work considers the use of voxels for object recognition using artificial intelligence methods.

## 1. Применение нейросетевых моделей в воксельной графике

В предложенной работе рассматривается распознавание с помощью нейронных сетей трехмерных объектов, созданных в CAD-системах T-FLEX CAD, SolidWorks и т.д. В качестве метода построения моделей используется воксельная графика. Воксель это элемент в трехмерном пространстве, содержащий информацию о значении координаты в трех осях: ширина (X), высота (Y), глубина (Z).

При построении объектов с помощью плоских полигонов проекция охватывает только контур объекта и отбрасывает внутреннюю информацию, которая может быть важна для распознавания по некоторым специфическим критериям. В качестве примера на рисунке 1 представлена полигональная модель куба и соответствующая вокселизированная модель с вычисленными векторами нормалей. Показанная модель имеет 10 942 поверхности вокселя.

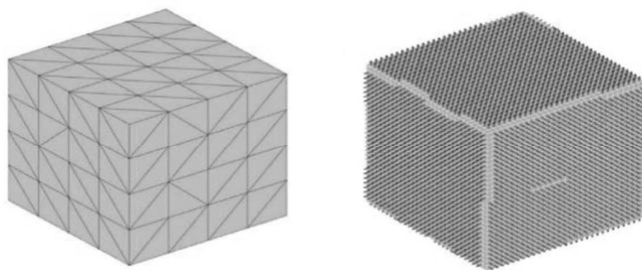


Рисунок 1. Вокселизированная модель куба

Одним из основных препятствий для работы с трехмерными данными непосредственно являются затраты на память и вычисления, связанные с дополнительными измерениями, вызванными появлением третьей оси. Например, для распознавания двумерных изображений достаточно часто используются изображения размером 256x256 пикселей, при этом обучение нейронных сетей на трехмерном наборе данных с разрешением 256x256x256 требует запредельных с вычислительной точки зрения затрат. Однако исследователи отмечают, что основной причиной разрыва в производительности между двумерными и трехмерными нейросетевыми моделями является архитектура сетей, а не разрешение входного сигнала.

Существует множество подходов к построению трехмерных нейросетевых моделей, таких как сверточные сети, капсульные сети и т. п. Классическим методом распознавания объектов для таких типов моделей является метод Хафа, в котором для распознавания изображений в трехмерном пространстве выделяются особые точки для сокращения вычислительных издержек. Эти точки выбираются при помощи специального алгоритма кластеризации [1].

Основным вопросом данной работы является исследование возможности распознавания трехмерных объектов с помощью векторов нормали и вокселей, полученных из трехмерной модели, используемых в качестве входных данных для нейронной модели. Идея основывается на том, что воксель примитивно можно представить в виде маленького трехмерного кубика, имеющего плоскости, к каждой из которых можно построить вектор нормали, который будет содержать информацию о положении и ориентации в пространстве.



## 2. Построение модели и проведение эксперимента

В качестве входных данных для нейросетевой модели используется вектор единичной нормали, рассчитанный для всех вокселей поверхности. В процессе вокселизации каждая часть трехмерной модели итеративно разбивается до тех пор, пока все вершины не попадут в один воксель, после чего значение вокселя устанавливается равным 1. В дополнение к этому генерируется вектор нормали, исходя из позиции вокселей.

Отдельно стоит отметить в каком виде следует представлять данные выборки. Если для хранения каждой координатной составляющей использовать тип float, то нормальный вектор займет 12 байт, что является большой нагрузкой на память. На практике используется один байт для хранения каждой координаты с точностью равной  $1/128 \approx 0,0078$ . Такая точность считается высокой и подходит для обучения.

Внешний вид вокселизированных моделей зависит от ориентации в пространстве, поэтому обучающие данные следует дополнить данными, полученными при вращении модели. В момент обучения данные, получаемые при каждом вращении одной и той же модели считаются разными обучающими выборками. На этапе тестирования все данные каждой выборки объекта подаются в сеть одной партией, и усредняются в выходном слое. Объединение нескольких выборок позволяет добиться лучших результатов распознавания объектов одного и того же класса.

На рисунке 2 представлено объединение вектора нормали и вокселя для распознавания 3D-объектов с помощью нейронных сетей, которое может быть реализовано как с жестким, так и с мягким разделением параметров скрытых слоев [2]. В первом случае скрытые слои разделяются между всеми задачами, при этом сохраняется несколько выходных слоев, специфичных для каждой задачи. Во втором случае все слои имеют свои параметры, а расстояние между параметрами регулируется, чтобы сравнивать их схожесть [3].

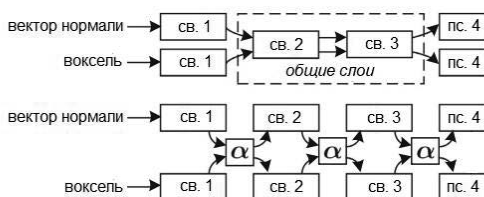


Рисунок 2. Объединение вектора нормали с вокселем

Характеристики, полученные с помощью сетевого обучения, могут быть использованы для поиска объектов. В данной работе полносвязный слой (пс) для каждой входной трехмерной модели представляет собой дескриптор этого объекта. Для выполнения распознавания объекта дескриптор модели сравнивается с остальными дескрипторами с помощью метрики расстояния ( $d_{ij}$ ).

Обучение сети происходит с помощью метода градиентного спуска. Скорость обучения начинается с 0,01 и уменьшается в 2,5 раза каждые 15 000 эпох. Размер партии равен 64, а вероятность того, что каждый элемент сохраняется при отсеве, равна 75%.

### 3. Оценка полученных результатов

Для оценки полученных результатов была рассмотрена трехмерная модель светофора, представленная на рисунке 3. Распознавание проводилось с помощью двух нейросетевых моделей, одна из которых была предложена в работе. В качестве второй использовалась сеть VoxNet.

Для построения вокселизированной модели и распознавания с помощью сети VoxNet используются два размера вокселей (0,1 м и 0,2 м) [4]. В данной работе был выбран размер вокселей – 0,3 м. Из множества точек выбирается куб  $(9 \text{ м})^3$ , содержащий максимальное количество точек на  $(1 \text{ м})^3$ , и вокселизируется до сетки 303, как показано на рисунке 3.

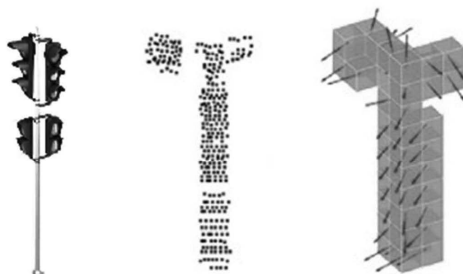


Рисунок 3. Распознавание модели светофора

Для оценки точности распознавания модели сравнивалось значение  $F$ -меры. После 5 попыток средняя величина  $F$ -меры предложенной модели составляла 0,74, в то время как модель VoxNet показала результат – 0,71.

В результате экспериментов, предложенный метод показал высокую конкурентоспособность. Методика распознавания трехмерных объектов с применением воксельной графики может быть использована для увеличения производительности нейросетевых моделей с сохранением высокой точности.

#### Список литературы:

1. Разлацкий С. А., Якимов П. Ю. Использование сверточных нейронных сетей для распознавания - Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2017
2. S. Ruder. An overview of multi-task learning in deep neural networks, arXiv:1706.05098, 2017
3. Y. Yang, T.M. Hospedales. Trace norm regularised deep multi-task learning, arXiv:1606.04038, 2016
4. D. Maturana, S. Scherer. VoxNet: a 3D convolutional neural network for real-time object recognition, in: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015.

# К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ПАРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКОГО ПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ

Э.В. Завитаев<sup>1</sup>, О.В. Русаков<sup>2</sup>, Е.П. Чухлеб<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.  
141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1,  
e-mail: [eduardzavitaev@yandex.ru](mailto:eduardzavitaev@yandex.ru)

<sup>2</sup>Государственный гуманитарно-технологический университет  
142611, Московская обл., г. Орехово-Зуево, ул. Зелёная, д. 22,  
e-mail: [olegrusmail@mail.ru](mailto:olegrusmail@mail.ru)

<sup>3</sup>Муниципальное учреждение дополнительного образования  
Центр дополнительного образования «Малая академия наук Импульс»  
142432, Московская обл., г. Черноголовка, Школьный бульвар, д. 1,  
e-mail: [e.chuhleb@mail.ru](mailto:e.chuhleb@mail.ru)

Интенсивное развитие новых технологий в микроэлектронике предполагает более глубокое теоретическое описание влияния механизмов рассеяния носителей зарядов на электромагнитные свойства малых проводящих объектов [1].

Кроме объемного и поверхностного рассеяния электронов (дырок) значительный вклад в электрическую проводимость таких объектов вносят парные столкновения носителей зарядов [2,3], причем общие физические соображения позволяют высказать предположение об ограничении их характерной скорости.

В настоящей работе рассчитывается плотность тока внутри тонкого проводящего слоя толщины  $b$  с учётом парных столкновений носителей зарядов.

Мы считаем, что внешнее переменное электрическое поле частоты  $\omega$ , вектор напряженности которого меняется со временем  $t$  как

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-i\omega t), \quad (1)$$

направлено вдоль координатной оси  $OZ$  параллельно слою. Ось  $OX$  направлена вглубь слоя ( $0 \leq x \leq b$ ). В качестве граничных условий задачи принято условие зеркально-диффузного отражения электронов от внутренних поверхностей слоя, коэффициенты зеркальности которых равны  $q_1$  и  $q_2$ .

Плотность тока в слое можно рассчитать через отклонение  $f_1$  функции распределения электронов от равновесной, которое возникает под действием высокочастотного поля (1):

$$\mathbf{j}_z = 2e \left( \frac{m}{h} \right)^3 \int v_z f_1 d^3v, \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $m$  – эффективная масса электрона,  $v_z$  – проекция скорости электрона.

Для отыскания отклонения функции распределения электронов от равновесной будем использовать кинетическое уравнение Больцмана с интегралом столкновений, учитывающим парные столкновения носителей зарядов [4], которые существенны при низких температурах.

Решение данного уравнения, найденное с помощью моментного метода [5], позволяет определить моментный коэффициент  $a_1(x)$  и рассчитать плотность тока (2) в слое как

$$j_z = -\frac{neI_0}{mI_0} \exp(-i\omega t) a_1(x), \quad (3)$$

где  $n$  – концентрация электронов проводимости,  $i$  – мнимая единица.

Здесь

$$I_0 = \int_0^\infty \frac{\sqrt{u} du}{\exp(u - u_\mu) + 1}, \quad I_1 = \int_0^{u_L} \frac{\sqrt{u} du}{\exp(u - u_\mu) + 1} - \frac{2u_L^{3/2}}{3(\exp(u_L - u_\mu) + 1)},$$

где  $u_\mu = \mu / kT$  ( $\mu$  – химический потенциал,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура),  $u_L$  – безразмерная квазипредельная энергия носителей заряда, которую удобно выражать через их среднюю безразмерную энергию

$$u_c = I_0^{-1} \frac{5}{3} \int_0^\infty \frac{u^{3/2} du}{\exp(u - u_\mu) + 1}$$

в виде  $u_L = \gamma u_c$ . Коэффициент пропорциональности  $\gamma$  может быть отдельно определен численными методами для каждого значения безразмерного химического потенциала  $u_\mu$  и приводится в таблице 1 ниже:

**Таблица 1.** Численные значения параметра  $\gamma$

$u_\mu$	$-\infty$	-10	-5	-3	-1	0	1	5	10	$\infty$
$\gamma$	6	5,6	5,4	5,2	5	4,8	4,4	2,5	1,8	1

Выражение для локальной электрической проводимости слоя  $\sigma$  получим, используя (1) и (3), как следствие закона Ома в дифференциальной форме:

$$\sigma = \frac{j_z}{E} = -\frac{neI_0 a_1(x)}{mI_0 E_0}.$$

### Список литературы

1. Sondheimer E.H. The mean free path of electrons in metals // *Advances in Physics*, 2001, V. 50, № 6, P. 499-537.
2. De Gennaro S., Rettori. A. The low-temperature electrical resistivity of potassium // *J. Phys. F: Met. Phys.*, 1984, V. 14, № 12, P. 237-242.
3. Wang L., Yin M., Khan A., Muhtadi S., Asif F., Choi E.S., Datta T. Scatterings and quantum effects in (Al, In)N/GaN heterostructures for high-power and high-frequency electronics // *Phys. Rev. Applied.*, 2018, V. 9, P. 024006-1-8.
4. Завитаев Э.В., Русаков О.В., Чухлеб Е.П. Электрическая проводимость тонкого металлического слоя с учётом отклонения от закона Видемана-Франца // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2022, № 8, С. 36-42.
5. Завитаев Э.В., Русаков О.В., Чухлеб Е.П. Локальная проводимость субмикронного металлического слоя с учётом поправки к закону Видемана-Франца // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика*, 2019, № 2, С. 74-82.

## К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ПРОВОДИМОСТИ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ МЕТАЛЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Э.В. Завитаев<sup>1</sup>, О.В. Русаков<sup>2</sup>, Т.Э. Симонова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
141005, Московская область, г. Мытищи, 1-я Институтская ул., 1  
e-mail: [eduardzavitaev@yandex.ru](mailto:eduardzavitaev@yandex.ru)

<sup>2</sup>Государственный гуманитарно-технологический университет,  
142600, Московская область, г. Орехово-Зуево, Зелёная ул., 22  
e-mail: [olegrusmail@mail.ru](mailto:olegrusmail@mail.ru); [shuher\\_96@mail.ru](mailto:shuher_96@mail.ru)

В работе [1] были проведены вычисления высокочастотной проводимости прямой металлической проволоки круглого сечения с зеркально-диффузными граничными условиями, что в дальнейшем нашло продолжение в изучении полупроводников [2].

В данной работе при расчете проводимости цилиндрической проволоки используется новая модель граничных условий для электронов на поверхности металла, обобщающая известные модели Фукса и Соффера [3].

Согласно этой модели, коэффициент зеркальности поверхности для электронов может быть представлен в виде

$$q(\theta) = q_0 + (1 - q_0) \exp(-b_1 |\cos\theta| - b_2 \cos^2\theta), \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол падения электронов,  $b_1$  и  $b_2$  – некоторые положительные параметры.

В случае, когда  $b_1 \gg 1$  и  $b_2 \gg 1$ , имеем  $q(\theta) = q_0$  – переходим к модели Фукса, а, когда  $q_0 = 0$  и  $b_1 \ll b_2$  – переходим к модели Соффера. При промежуточных значениях параметров предложенная модель предлагает интерполяцию между известными моделями.

Далее задача о расчете проводимости проволоки решается в стандартной постановке. Внешнее переменное электрическое поле частоты  $\omega$ , вектор напряженности которого меняется со временем  $t$  как

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-i\omega t), \quad (2)$$

воздействует на электроны внутри проволоки и вызывает появление внутри нее высокочастотного тока плотности

$$\mathbf{j} = 2e \frac{m^3}{h^3} \int \mathbf{v} f_1 d^3\mathbf{v}, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $m$  – эффективная масса электрона,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости электрона,  $f_1$  – отклонение функции распределения электронов от равновесной, для отыскания которого привлекается кинетическое уравнение Больцмана в приближении времени релаксации.

После перехода к цилиндрической системе координат в пространстве скоростей и применения закона Ома в дифференциальной форме, с учетом (1)-(3), получаем выражение для расчета локальной проводимости проволоки:

$$\sigma(\xi) = \frac{3 n e^2 R}{\pi v_F m} \int_0^1 \int_0^\pi \frac{\rho \sqrt{1 - \rho^2}}{v} \left\{ \frac{(q - 1) \exp(-v\eta/\rho)}{1 - q \exp(-v\eta_0/\rho)} + 1 \right\} dp d\alpha, \quad (4)$$

$$\eta = \xi \cos \alpha + \sqrt{1 - \xi^2 \sin^2 \alpha}, \quad \eta_0 = 2 \sqrt{1 - \xi^2 \sin^2 \alpha},$$

$$\xi = \frac{r_\perp}{R}, \quad \rho = \frac{v_\perp}{v_F}, \quad v = \left( \frac{1}{\tau} - i\omega \right) \frac{R}{v_F},$$

где  $R$  – радиус проволоки;  $n$ ,  $\tau$ ,  $v_F$  – соответственно, концентрация, время релаксации и скорость Ферми электронов;  $r_\perp$ ,  $v_\perp$  – компоненты радиус-вектора электрона и его скорости в плоскости перпендикулярной оси симметрии проволоки.

Анализ результатов численного расчета локальной проводимости проволоки (4), проведенный с помощью новой модели граничных условий для электронов на поверхности металла, позволяет упростить сравнение результатов, полученных на основе прежних моделей, и, выявить ряд особенностей проводимости не характерных для их применения.

### Список литературы

1. Завитаев Э.В., Юшканов А.А. Высокочастотная проводимость тонкой цилиндрической проволоки из металла // Микроэлектроника, 2008, Т. 37, № 6, С. 429–438.
2. Кузнецова И.А., Юшканов А.А., Хадчукаев Р.Р. Высокочастотная проводимость тонкой полупроводниковой цилиндрической проволоки при произвольной температуре // Физика и техника полупроводников, 2009, Т. 43, № 5, С. 645-650.
3. Каримов Ф. А., Юшканов А. А. Зеркально-диффузные граничные условия для электронов на поверхности металла с учётом зависимости от угла падения // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика, 2020, № 1, С. 50–56.

## ЗАВИСИМОСТЬ САМОИНДУКЦИИ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ МЕТАЛЛА ОТ МЕХАНИЗМА ПОВЕРХНОСТНОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Э.В. Завитаев<sup>1</sup>, О.В. Русаков<sup>2</sup>, К.Е. Харитонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мытищинский филиал ФГОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», Мытищи, Россия  
141005, ул. 1-я Институтская, 1  
[EduardZavitaev@yandex.ru](mailto:EduardZavitaev@yandex.ru)

<sup>2</sup>ГОУ ВО МО «Государственный гуманитарно-технологический университет»,  
Орехово-Зуево, Россия  
142611, ул. Зелёная, 22  
[olegrusmail@mail.ru](mailto:olegrusmail@mail.ru), [kirillharitonov1@mail.ru](mailto:kirillharitonov1@mail.ru)

**Аннотация.** Выполнен расчет самоиндукции внутри тонкой цилиндрической проволоки из металла на основе решения кинетического уравнения Больцмана для электронов в металле. Рассмотрен общий случай, когда отношение длины свободного пробега электронов к радиусу проволоки может принимать произвольные значения. В качестве граничных условий задачи принято условие, учитывающее зависимость коэффициента зеркальности от дефектов поверхности и угла падения электронов на внутреннюю поверхность проволоки

**Ключевые слова:** тонкая проволока, самоиндукция, магнитный поток, сила тока, магнитная индукция, плотность тока.

Электрические и магнитные свойства проводников, линейный размер которых сравним с длиной свободного пробега электронов  $L$ , существенно отличается от свойств «массивных» проводящих объектов.

Вопросы, касающиеся расчета электрической проводимости тонкой цилиндрической проволоки из металла, обсуждались в работах [1, 2]. Магнитная индукция внутри такой проволоки определялась в работах [3, 4]. В упомянутых работах применяется подход, основанный на решении кинетического уравнения Больцмана, для электронов в металле.

В данной работе рассматривается цилиндрическая проволока из немагнитного металла (относительная магнитная проницаемость  $\mu \approx 1$ ) радиуса  $R$  и длины  $D$  (будем считать, что  $D \gg R$ ), к концам которой приложено переменное электрическое напряжение частоты  $\omega$ . Принимается, что направление электрического поля совпадает с осью цилиндра. Скин-эффект не учитывается (предполагается, что  $R < \gamma$  – глубины скин-слоя).

Однородное периодическое по времени электрическое поле, вектор напряженности которого  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-i\omega t)$ , воздействует на электроны проводимости внутри проволоки и вызывает появление внутри нее высокочастотного тока с плотностью  $\mathbf{j}$ .

Проведем расчет самоиндукции, обусловленной магнитным полем внутри проволоки.

Как известно, самоиндукция  $L$  – это коэффициент пропорциональности между магнитным потоком  $\Phi$  и силой тока  $I$ , создающей магнитное поле:

$$\Phi = LI \Rightarrow L = \frac{\Phi}{I}. \quad (1)$$

Запишем формулу для расчета магнитного потока  $\Phi$  через элементарную площадку проводника  $dS$ :

$$\Phi = \int_0^1 \frac{I(\delta)}{I} B(\delta) DRd\delta = \frac{DR}{I} \int_0^1 I(\delta) B(\delta) d\delta, \quad (2)$$

где  $dS = Ddr = DRd\delta$ ,  $\delta = r_{\perp B}/R$  – «безразмерный радиус индукции»,  $B(\delta)$  и  $I(\delta)$  – магнитная индукция и сила тока в области интегрирования ( $r < R$ ) соответственно,  $I$  – полная сила тока.

Выражение для магнитной индукции  $B$  внутри проволоки, где в качестве граничного условия используется зависимость коэффициента зеркальности  $q$  от дефектов поверхности  $H$  и угла падения электронов  $\theta$  на внутреннюю поверхность проволоки (модель Соффера), получено в работе [4]. Данное граничное условие можно записать в следующем виде:

$$q(H, \cos \theta) = \exp(-4\pi H)^2 \cos^2 \theta), \quad \cos \theta = \rho \cos \alpha, \quad H = \frac{h_s}{\lambda_F},$$

где  $h_s$  – среднеквадратичная высота поверхностного рельефа,  $\lambda_F$  – длина волны де-Бройля электрона на поверхности Ферми.

Тогда

$$B(\delta) = \frac{3\mu_0 n e^2 R^2 E_z}{\pi v_F m \delta} J_B, \quad (3)$$

где

$$J_B = \int_0^\delta \int_0^1 \int_0^\pi \frac{\rho \sqrt{1-\rho^2}}{v} \left( \frac{\exp(-4\pi H)^2 \cos^2 \alpha - 1}{1 - \exp(-4\pi H)^2 \cos^2 \alpha} \exp(-v\eta/\rho) + 1 \right) \xi d\xi d\rho d\alpha,$$

$$\xi = \frac{r_\perp}{R}, \quad \rho = \frac{v_\perp}{v_F}, \quad v = \left( \frac{1}{\tau} - i\omega \right) \frac{R}{v_F},$$

$$\eta = \xi \cos \alpha + \sqrt{1 - \xi^2 \sin^2 \alpha}, \quad \eta_0 = 2\sqrt{1 - \xi^2 \sin^2 \alpha}.$$

Здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная вакуума;  $n$ ,  $e$ ,  $m$  – соответственно, концентрация, заряд и масса электронов;  $v_F$  – скорость Ферми;  $\tau$  – электронное время релаксации.

Запишем формулы для расчета силы тока внутри области интегрирования  $I(\delta)$  и полной силы тока  $I$  через элементарную площадку проводника  $dS$ :

$$I(\delta) = \int_0^\delta j(\xi) dS = 2\pi R^2 \int_0^\delta j(\xi) \xi d\xi, \quad I = \int_0^1 j(\xi) dS = 2\pi R^2 \int_0^1 j(\xi) \xi d\xi,$$

где  $dS = 2\pi R^2 \xi d\xi$ .

Выражение для плотности тока  $\mathbf{j}$  через поперечное сечение тонкой цилиндрической проволоки было получено в работе [2].

Тогда

$$I(\delta) = \frac{6ne^2 R^3 E_z}{v_F m} J_r, \quad (4)$$

где



$$J_r = \int_0^\delta \int_0^1 \int_0^\pi \frac{\rho \sqrt{1-\rho^2}}{v} \left( \frac{(\exp(-4\pi H \rho \cos \alpha)^2) - 1}{1 - \exp(-4\pi H \rho \cos \alpha)^2} \exp(-v\eta/\rho) + 1 \right) \xi d\xi d\rho d\alpha,$$

$$I = \frac{6ne^2 R^3 E_z}{v_F m} J_I, \quad (5)$$

где

$$J_I = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^\pi \frac{\rho \sqrt{1-\rho^2}}{v} \left( \frac{(\exp(-4\pi H \rho \cos \alpha)^2) - 1}{1 - \exp(-4\pi H \rho \cos \alpha)^2} \exp(-v\eta/\rho) + 1 \right) \xi d\xi d\rho d\alpha.$$

Подставим полученные выражения (3), (4) и (5) в формулу (2):

$$\Phi = \frac{3\mu_0 n e^2 R^3 E_z D}{\pi v_F m} \frac{1}{J_I} \int_0^1 J_r J_B d\delta. \quad (6)$$

Поделив (6) на (5) найдем искомую самоиндукцию  $L$ , обусловленную магнитным полем внутри проволоки:

$$L = \frac{\mu_0 D}{2\pi} \frac{1}{(J_I)^2} \int_0^1 J_r J_B d\delta. \quad (7)$$

### Список литературы

1. Завитаев Э.В. Высокочастотная проводимость тонкой цилиндрической проволоки из металла / Э.В. Завитаев, А.А. Юшканов // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 6. С. 429-438.
2. Кузнецова И.А. Влияние механизма поверхностного рассеяния электронов на высокочастотную проводимость тонкой металлической проволоки / И.А. Кузнецова, А.В. Чапкин, А.А. Юшканов // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 1. С. 45-51.
3. Завитаев Э.В. Расчет магнитной индукции внутри тонкой цилиндрической проволоки из металла / Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, К.Е. Харитонов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Физика-Математика». 2016. № 2. С. 74-84.
4. Завитаев Э.В. Зависимость магнитной индукции внутри тонкой цилиндрической проволоки из металла от механизма поверхностного рассеяния электронов / Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, А.И. Уткин, К.Е. Харитонов // Микроэлектроника. 2022. Т. 51. № 2. С. 148-154.

# РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТОНКОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СЛОЯ В СЛУЧАЕ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Э.В. Завитаев<sup>1</sup>, Т.Э. Симонова<sup>2</sup>, А.И. Уткин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, 141005, Московская область, г. Мытищи, 1-я Институтская ул., 1

e-mail: [eduardzavitaev@yandex.ru](mailto:eduardzavitaev@yandex.ru)

<sup>2</sup>Государственный гуманитарно-технологический университет, 142600, Московская область, г. Орехово-Зуево, Зелёная ул., 22

e-mail: [aiutkin@yandex.ru](mailto:aiutkin@yandex.ru)

Расчёт электрической проводимости тонкого полупроводникового слоя с учётом характера взаимодействия электронов с его поверхностями впервые был проведён в работе [1]. Однако в работе не рассматривался случай, когда поле неоднородно.

В настоящей работе вычислена локальная проводимость тонкого полупроводникового слоя, к которому приложено переменное электрическое напряжение частоты  $\omega$ . Скин-эффект не учитывается. Рассмотрим тонкий полупроводниковый слой толщиной  $a$  и коэффициентами зеркальности верхней  $q_1$  и нижней  $q_2$  поверхностей слоя, в случае внешнего неоднородного периодического по времени электрического поля  $\mathbf{E}$ . Пусть электрическое поле параллельно полупроводниковому слою и направлено вдоль оси  $X$ . Ось  $Z$  направлена вверх, вглубь тонкого слоя. Электрическое поле имеет вид:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-i\omega t + ik_y y), \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число,  $y$  – координата.

Исходя из того, что неравновесная функция Ферми-Дирака для электронов (дырок)  $f(\mathbf{v}, z, t) = f_0(\varepsilon) + f_1(\mathbf{v}, z, t)$  удовлетворяет кинетическому уравнению Больцмана [2], имеем:

$$ik_y v_y f_1 + v_z \frac{\partial f_1}{\partial z} + e v_x E \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} - i \omega f_1 = -\frac{f_1}{\tau}, \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона (дырки),  $v_z$ ,  $v_x$ ,  $v_y$  – соответствующие проекции вектора их скорости на координатные оси,  $\tau$  – время релаксации электрона (дырки),  $\varepsilon = mv^2/2$  – кинетическая энергия электрона (дырки),  $v$  – модуль вектора скорости электрона (дырки),  $m$  – эффективная масса электрона (дырки).

Здесь

$$f_0 = \frac{1}{\exp[(\varepsilon - \mu) / k_b T] + 1}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} = -\frac{\exp[(\varepsilon - \mu) / k_b T]}{(\exp[(\varepsilon - \mu) / k_b T] + 1)^2 k_b T}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – химический потенциал,  $k_b$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

Для уравнения (2) будем использовать зеркально-диффузные граничные условия в случае отражения электронов (дырок) от верхней и нижней поверхности тонкого проводящего слоя:

$$\begin{cases} f_1^+(v_z, 0) = q_1 f_1^-( -v_z, 0), \\ f_1^-( -v_z, a) = q_2 f_1^+( v_z, a). \end{cases} \quad (5)$$

Выражение для плотности тока  $\mathbf{j}$ , вызванного приложенным напряжением, рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{j} = 2e \left( \frac{m}{h} \right)^3 \int \mathbf{v} f_1 d^3 \mathbf{v}. \quad (6)$$

Концентрация электронов (дырок)  $n$ , определяется с помощью распределения Ферми–Дирака [3]:

$$n = 2 \left( \frac{m}{h} \right)^3 \int f_0 d^3 \mathbf{v} = 2 \left( \frac{m}{h} \right)^3 4\pi \int v^2 f_0 dv = 8\pi \left( \frac{m}{h} \right)^3 \int \frac{v^2 dv}{\exp\left[ \left( (mv^2/2) - \mu \right) / kT \right] + 1}, \quad (7)$$

где  $h$  – постоянная Планка.

Для вычисления плотности тока (6), а затем и локальной проводимости удобно перейти в сферическую систему координат в пространстве скоростей  $(v, \theta, \varphi)$ , где  $v$  – модуль вектора скорости электрона (дырки),  $\theta$  – полярный угол,  $\varphi$  – азимутальный угол,  $v_z$  – полярная ось; причём,  $v_z = v \cos(\theta)$ ,  $v_x = v \sin(\theta) \cos(\varphi)$ ,  $v_y = v \sin(\theta) \sin(\varphi)$ .

Тогда:

$$\sigma = \frac{ne^2}{4\pi} \left( \int_0^\infty \frac{v^2 dv}{\exp\left[ \left( (mv^2/2) - \mu \right) / k_b T \right] + 1} \right)^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi v^3 \cos(\varphi) \left( \int_0^{\pi/2} \sin^2(\theta) A \left( 1 + \frac{q_1 (1 - \exp(-\Omega) + q_2 \exp(-\Omega)) - 1}{1 - q_1 q_2 \exp(-2\Omega)} \right. \right. \\ \left. \left. \cdot \exp(-\Omega \xi) d\theta + \int_{\pi/2}^\pi \sin^2(\theta) A \left( 1 + \frac{q_2 (1 - \exp(-\Omega) + q_1 \exp(-\Omega)) - 1}{1 - q_1 q_2 \exp(-2\Omega)} \right) \exp(-\Omega(1 - \xi)) d\theta \right) dq d\varphi dv.$$

$$\text{Здесь } A = \frac{v \sin(\theta) \cos(\varphi)}{v} \frac{\exp\left[ \left( (mv^2/2) - \mu \right) / k_b T \right]}{\left( \exp\left[ \left( (mv^2/2) - \mu \right) / k_b T \right] + 1 \right)^2 k_b T},$$

$$v = \frac{1}{\tau} - i\omega + ik v \sin(\theta) \sin(\varphi), \Omega = av / v \cos(\theta), \xi = z / a.$$

### Список литературы

1. Кузнецова И.А., Романов Д.Н., Савенко О.В., Юшканов А.А. Расчёт высокочастотной электропроводности тонкого полупроводникового слоя в случае различных коэффициентов зеркальности его поверхностей // Микроэлектроника, Т. 46, № 4, 2017, С. 275-283.

2. Уткин А.И., Юшканов А.А. Влияние коэффициентов зеркальности на проводимость тонкого металлического слоя в случае неоднородного, периодического по времени электрического поля // Микроэлектроника, Т. 45, № 5, 2016, С. 386-395.
3. Завитаев Э.В., Русаков О.В., Чухлеб Е.П. Влияние парных столкновений носителей зарядов на электрическую проводимость тонкого проводящего слоя // ЖТФ, Т. 11, 2023, С. 1561-1569.

# ИНДЕКС МАСЛОВА В СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ ДЛЯ ГАМИЛЬТОНОВЫХ СИСТЕМ С ОБЩИМИ САМОСОПРЯЖЕННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Ю.В. Елисеева

ФГБОУ ВПО МГТУ “СТАНКИН”, Москва, Россия  
127055, Вадковский пер., 3а

Тел.: (+7 499)972-95-20, e-mail: [elyseeva@gmail.com](mailto:elyseeva@gmail.com)

В докладе представлены результаты, позволяющие выделить спектр Дирихле в краевых задачах для линейных дифференциальных гамильтоновых систем с общими самосопряженными граничными условиями:

$$y' = J_n H(t, \lambda) y, H(t, \lambda) = H^T(t, \lambda), t \in [a, b], \lambda \in \square, y = \begin{pmatrix} x(t, \lambda) \\ u(t, \lambda) \end{pmatrix},$$
$$R_1 \begin{pmatrix} x(a, \lambda) \\ x(b, \lambda) \end{pmatrix} + R_2 \begin{pmatrix} -u(a, \lambda) \\ u(b, \lambda) \end{pmatrix} = 0, R_1, R_2 \in \square^{2n \times 2n},$$
$$R = (R_1 \ R_2), \text{rang}(R) = 2n, R J_{2n} R^T = 0, J_m = \begin{bmatrix} 0_m & I_m \\ -I_m & 0_m \end{bmatrix},$$
(1)

где  $I_m$ ,  $0_m$  обозначают единичную и нулевую матрицы размерности  $m \times m$ . Симметрическая матрица-функция  $H(t, \lambda)$  (гамильтониан системы (1)) нелинейно зависит от вещественного спектрального параметра  $\lambda \in \square$  и предполагается непрерывной по  $t \in [a, b]$  и  $\lambda \in \square$  вместе со своей производной, удовлетворяющей условию монотонности  $H'_\lambda(t, \lambda) \geq 0$ . Результаты основаны на представлении числа собственных значений (1) на произвольном конечном интервале с помощью индекса Маслова [1], теоремах отделимости для индекса Маслова [2] с использованием сравнительного индекса [3] и являются непрерывным аналогом спектральных теорем для дискретных симплектических краевых задач с общими граничными условиями [4]. В качестве приложений рассматривается спектральная теория для квантовых графов, в частности, обобщения результатов Виттрика-Вильямса для произвольных квантовых графов на компактном интервале [5].

## Список литературы:

1. Howard P., Jung S., Kwon B. // Journal of Dynamics and Differential Equations, 2018, v.30, P. 1703–1729.
2. Elyseeva J., Šepitka P., Šimon Hilscher R. // Journal of Dynamics and Differential Equations, 2023, v. 35, P. 2589–2620.
3. Елисеева Ю.В. // Дифференциальные уравнения, 2009, т. 45, №3, P. 431—444.
4. Elyseeva J.V., Šimon Hilscher R., Linear Algebra and its Applications, 2018, v. 558, 108–145.
5. Williams FW., Howson W.P., Watson A., // 2004, Proceedings of the Royal Society A, 460 (2045), P.1243-1268.

# РАСЧЁТ ПРОФИЛЯ СТРУЖЕЧНОЙ КАНАВКИ ДЛЯ НАЗНАЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ФОРМЫ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ СПИРАЛЬНОГО СВЕРЛА С ТРЕМЯ ЗУБЬЯМИ

Артём Ершов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория Технологий Микрообработки, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

<sup>2</sup> Кафедра Инструментальной Техники и Технологий Формообразования, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

**Abstract.** В данной статье представлен анализ трехзубых сверл, в котором предложена математическая модель профиля стружечной канавки, обеспечивающая управляемую форму главной режущей кромки. Предложенная модель разработана с целью обеспечения стабильных условий резания при сверлении. Через детальный анализ геометрии стружечной канавки установлены взаимосвязи между параметрами конструкции инструмента и геометрическими параметрами режущего клина. Управляемый профиль главной режущей кромки способствует улучшению стойкости сверла. Полученные результаты исследования предоставляют ценные рекомендации для проектирования и оптимизации трехзубых сверл, предлагая систематический подход к проектированию специальных конструкций сверл для различных конфигураций отверстий и обрабатываемого материала.

## 1. Введение.

Обработка отверстий является важным аспектом в большинстве машиностроительных производств. Отверстия высокой точности можно получить за счет применения токарной [1], электроэрозионной [2,3], сверлильной [4,5] и других видов операций. Сверление, как один из ключевых процессов в данной области, продолжает претерпевать трансформации с целью улучшения конструкций сверл. В области перспективных конструкций трехзубые сверла привлекают особое внимание благодаря своей способности обеспечивать стабильные условия резания [6]. Все больше исследований, предлагают новые методы моделирования, анализ и контроль конструктивных и геометрических параметров, а также инновационные подходы к проектированию сверл [4–12].

Некоторые работы фокусируются на применении современных CAD-технологий для моделирования геометрии сверл [10], в то время как другие предлагают комплексный подход к оптимизации геометрии сверл с использованием симуляционных методов [7]. Одновременно исследователи предлагают новые математические модели, например, моделирование режущей кромки трилезвийного сверла [6,12,13].

Стабильность резания напрямую зависит от конструктивных и геометрических параметров режущей части инструмента [14,15]. Существуют различные способы увеличения стойкости режущей части сверла. Распространенным способом повышения стойкости является равномерное распределение сил резания вдоль режущей кромки [5]. Исследование кинематических и статических параметров режущего клина инструмента вдоль режущей кромки является одним из методов анализа распределения сил резания.

Именно распределение геометрических параметров, таких как передний и задний угол, а также угол наклона режущей кромки в радиальном сечении влияют на стойкость режущей части сверла.

При исследовании формы режущей кромки должны учитываться факторы с максимальным воздействием на процесс резания, такие как жесткость и прочность конструкции, крутящий момент и силы, действующие на рабочие поверхности инструмента и характер отведения стружки из зоны резания [4,5,7].

Данная работа описывает математическую модель, определяющая профиль стружечной канавки для обеспечения управляемой формы главной режущей кромки. Разработанный подход направлен на повышении стабильности процесса сверления, учитывая влияние геометрических параметров инструмента на зоны концентраций напряжений.

## 2. Результаты. Обсуждение

### 2.1. Аналитический метод определения профиля стружечной канавки

В данном исследовании аналитически определяется профиль стружечной канавки для формирования прямолинейной главной режущей кромки под углом  $\iota$ , схема трехзубого сверла показана на рис. 1.

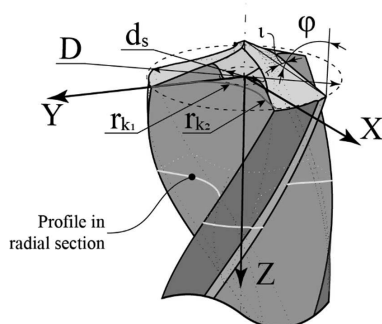


Рис. 1. Схема трехзубого сверла

Существуют различные формы главной режущих кромок, каждая из которых используются при сверлении определенного типа материала. В трехзубых конструкциях используются главные режущие кромки в виде кривых линий: выпуклых или вогнутых, либо в виде прямой линии. Увеличенная стойкость режущей части сверла, может быть реализована методом обеспечения равномерного распределения угла наклона проекции главной режущей кромки на радиальную плоскость. Для этого режущая кромка либо формируется под некоторым углом  $\iota$  (рис. 1), либо параллельно на некотором расстоянии относительно линии, проходящей через центр и уголок сверла. Для формирования пространственной прямой линии режущей кромки для различных групп параметров профиля стружечной канавки, угла в плане и угол наклона главной режущей кромки была сформирована математическая модель, которая определяет форму участка профиля стружечной канавки передней поверхности в радиальном сечении:

$$\begin{aligned}
 X(t) &= t \cdot \cos \left[ \frac{2\pi \cdot G1}{T \cdot \tan(\varphi)} \right] + \sin \left[ \frac{2\pi \cdot [R - G2]}{T \cdot \tan(\varphi)} \right] \\
 &\quad \cdot \left( R + t \cdot \tan \left( \frac{\pi}{2} - \iota \right) \right) \\
 Y(t) &= \cos \left[ \frac{2\pi \cdot G1}{T \cdot \tan(\varphi)} \right] \cdot \left( R + t \cdot \tan \left( \frac{\pi}{2} - \iota \right) \right) - t \cdot \sin \left[ \frac{2\pi \cdot G1}{T \cdot \tan(\varphi)} \right] \\
 &\quad + \sin \left[ \frac{2\pi \cdot G2}{T \cdot \tan(\varphi)} \right] \cdot \left( R + t \cdot \tan \left( \frac{\pi}{2} - \iota \right) \right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $t$  - параметр;  $R$  – радиус сверла;  $\iota$  – угол между осью и режущей кромкой на участке главной режущей кромкой;  $\varphi$  - угол в плане;  $T$  – шаг винтовой стружечной канавки сверла, а  $G1$  и  $G2$ :

$$\begin{aligned}
 G1 &= R - \sqrt{\left( R + t \cdot \tan \left( \frac{\pi}{2} - \iota \right) \right)^2 - t^2} \\
 G2 &= R - \sqrt{\left( R + t \cdot \tan \left( \frac{\pi}{2} - \iota \right) \right)^2 + t^2}
 \end{aligned}$$

Главная режущая кромка, образованная по формуле (1), формируется под углом  $\iota$ , вместе с углом наклона стружечной канавки  $\omega$ , формируют переднюю поверхность. Распределение сил резания вдоль режущей кромки, определяется формой передней поверхности. Измерение переднего угла при этом происходит в нормальном сечении. Профиль передней поверхности в нормальном сечении может быть определено по формуле:

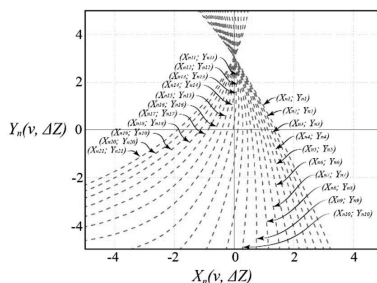
$$\begin{aligned}
 X_n(v_0, \Delta Z) &= -\cos(\varphi) \\
 &\quad \cdot \left( \sin(v_0) \cdot \left( R + \tan \left( \frac{\pi}{2} - \iota \right) \right) \cdot X_t(v_0, \Delta Z) \right. \\
 &\quad \left. - \cos(v_0) \cdot X_t(v_0, \Delta Z) \right) - \sin(\varphi) \cdot \left( \frac{R - G3}{\tan(\varphi)} + \frac{T \cdot v_0}{2\pi} \right) \\
 Y_n(v_0, \Delta Z) &= \cos(T) \\
 &\quad \cdot \left( \cos(v_0) \left( R + \tan \left( \frac{\pi}{2} - \iota \right) X_t(v_0, \Delta Z) \right) \right. \\
 &\quad \left. + \sin(v_0) X_t(v_0, \Delta Z) \right) \\
 &\quad - \sin(T) \left( \sin(\varphi) \left( \sin(v_0) \right. \right. \\
 &\quad \cdot \left( R + \tan \left( \frac{\pi}{2} - \iota \right) \cdot X_t(v_0, \Delta Z) \right) - \cos(v_0) \\
 &\quad \cdot X_t(v_0, \Delta Z) \left. \right) - \cos(\varphi) \cdot \left( \frac{R - G3}{\tan(\varphi)} + \frac{T \cdot v_0}{2\pi} \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$3 = \sqrt{X_t(v_0, \Delta Z)^2 + \left( R + \tan \left( \frac{\pi}{2} - \iota \right) \cdot X_t(v_0, \Delta Z) \right)^2}$$



Характер распределения совокупности нормальных сечений передней поверхности вдоль передней поверхности для конструкции, в которой режущая кромка расположена под некоторым углом  $\varphi$ , не превышающим  $20^\circ$  показан на рис.2



**Рис. 2.** График совокупности нормальных сечений передней поверхности вдоль главной режущей кромки

### 3. Заключение

Таким образом, аналитическая модель профиля передней поверхности стружечной канавки, которая позволяет формировать прямолинейную режущую кромку под некоторым углом, для обеспечения плавного перехода к подточке режущей кромки, которая может также выступать прямой линией, а между главной режущей кромкой и подточкой может применяться радиус скругления. Математическая модель нормальных сечений позволит найти точку начала участка подточки в зависимости от значения нормального переднего угла под определенный обрабатываемый материал и конфигурацию отверстия.

### 4. Благодарности

Авторы проводили исследования на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ "СТАНКИН".

Выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00999 (<https://rscf.ru/project/23-29-00999/>)

### References

1. Khusainov, R.M.; Golovko, A.N.; Petrov, S.M.; Yurasov, S.Yu.; Balabanov, I.P.; Grechishnikov, V.A.; Romanov, V.B.; Pivkin, P.M. Selecting Optimal Cutting Tools for Lathes. *Russ. Engin. Res.* 2017, 37, 351–353, doi:10.3103/S1068798X17040128.
2. Grigoriev, S.N.; Nadykto, A.B.; Volosova, M.A.; Zelensky, A.A.; Pivkin, P.M. WEDM as a Replacement for Grinding in Machining Ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC Cutting Inserts. *Metals* 2021, 11, 882, doi:10.3390/met11060882.
3. Grigoriev, S.N.; Volosova, M.A.; Okunkova, A.A.; Fedorov, S.V.; Hamdy, K.; Podrabinnik, P.A.; Pivkin, P.M.; Kozochkin, M.P.; Porvatov, A.N. Electrical Discharge Machining of Oxide Nanocomposite: Nanomodification of Surface and Subsurface Layers. *J. Manuf. Mater. Process.* 2020, 4, 96, doi:10.3390/jmmp4030096.

4. Mellinger, J.C.; Burak Ozdoganlar, O.; DeVor, R.E.; Kapoor, S.G. Modeling Chip-Evacuation Forces and Prediction of Chip-Clogging in Drilling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2002, 124, 605–614, doi:10.1115/1.1473146.
5. Paul, A.; Kapoor, S.G.; DeVor, R.E. Chisel Edge and Cutting Lip Shape Optimization for Improved Twist Drill Point Design. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2005, 45, 421–431, doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.09.010.
6. Pivkin, P.M.; Ershov, A.A.; Nadykto, A.B. Mathematical Modelling of the Cutting Edge of a Tri-Flute Drill.; IEEE: Vladivostok, Russia, October 6 2020; pp. 1–5.
7. Abele, E.; Fujara, M.; Scha'fer, D. Holistic Approach for a Simulation-Based Twist Drill Geometry Optimization.; ASME/EDC: Corvallis, Oregon, USA, January 1 2011; pp. 137–144.
8. Pivkin, P.M.; Grechishnikov, V.A.; Ershov, A.A.; Volosova, M.A.; Nadykto, A.B. Reverse Engineering of Geometric Models of Advanced Curved Edge Drills Using Optical Measuring Systems.; SPIE: Online Only, Spain, September 12 2021; p. 25.
9. Berbinschi, S.; Baroiu, N.; Teodor, V.; Oancea, N. A Profiling Method for Secondary Order Tool for Drill Manufacturing.; September 1 2011; p. 62.
10. Baroiu, N.; Berbinschi, S. CAD Modeling of Helical Cylindrical Surfaces with Applications for Helical Drills. *Buletinul Științific al Universității „POLITEHNICA” din Timișoara* 2013, 58, 31–34.
11. Baroiu, N.; Berbinschi, S.; Teodor, V.; Oancea, N. Comparative Study of Drill's Flank Geometry Developed with the Catia Software. *The Annals of “Dunărea de jos” university of Galați fascicle v, technologies in machine building* 2012.
12. Baroiu, N.; Teodor, V.; Berbinschi, S.; Oancea, N. Multi-Flute Helical Drills - The Modeling of a Hyperboloid Sharpening Method of the Back Faces.; September 1 2011; p. 41.
13. Pivkin, P.M.; Grechishnikov, V.A.; Ershov, A.A.; Nadykto, A.B. A New Method for the Precise Determination of Rational Geometric Parameters of the Helical Groove and Cutting Part of High-Performance Tri-Flute. In *Proceedings of the Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence V; and Advanced Manufacturing Technologies for Micro- and Nanosystems in Security and Defence III*; SPIE: Online Only, United Kingdom, September 2020; p. 36.
14. Grechishnikov, V.; Grigoriev, S.; Pivkin, P.; Volosova, M.; Isaev, A.; Nikitin, D.; Minin, I. Design of Toroid-Shaped Solid Ceramic End Mill. *EPJ Web Conf.* 2019, 224, 05001, doi:10.1051/epjconf/201922405001.
15. Wan, M.; Li, S.-E.; Yuan, H.; Zhang, W.-H. Cutting Force Modelling in Machining of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites (PMCs): A Review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2019, 117, 34–55, doi:10.1016/j.compositesa.2018.11.003.
16. Grechishnikov, V.A.; Petukhov, Yu.E.; Pivkin, P.M.; Isaev, A.V.; Romanov, V.B.; Domnin, P.V. Lathe Turning of Complex-Shaped Parts Providing Desired Surface Microrelief. *Russ. Engin. Res.* 2016, 36, 229–231, doi:10.3103/S1068798X16030059.
17. Grechishnikov, V.A.; Petukhov, Yu.E.; Pivkin, P.M.; Romanov, V.B.; Ryabov, E.A.; Yurasov, S.Yu.; Yurasova, O.I. Trochoidal Slot Milling. *Russ. Engin. Res.* 2017, 37, 821–823, doi:10.3103/S1068798X17090106.
18. Grigoriev, S.N.; Grechishnikov, V.A.; Volosova, M.A.; Jiang, X.; Pivkin, P.M. Investigation of Technological Parameters for Machining Toroidal Section of Solid Ceramic End Mills. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020, 971, 022065, doi:10.1088/1757-899X/971/2/022065.

19. Grigoriev, S.N.; Migranov, M.S.; Shekhtman, S.R.; Migranov, A.M.; Ershov, A.A.; Pivkin, P.M. Sensor Information Processing in the Control of Quality Parameters of Functional Coatings of Products Deposited by Vacuum-Arc Spraying. In Proceedings of the SPIE Future Sensing Technologies 2021; SPIE: Online Only, Japan, November 2021; p. 52.
20. Grigoriev, S.N.; Pivkin, P.M.; Grechishnikov, V.A.; Petukhov, Y.E.; Volosova, M.A.; Nadykto, A.B. High-Precision Method for Determining the Optimal Trajectory of Movement of a Conical Grinding Wheel Relative to the Helical Grooves of Solid Ceramic Mills.; Proc. SPIE: Online Only, United Kingdom, September 20 2020; p. 48.
21. Metel, A.; Melnik, Y.; Mustafaev, E.; Minin, I.; Pivkin, P. Combined Processing of Micro Cutters Using a Beam of Fast Argon Atoms in Plasma. *Coatings* 2021, 11, 465, doi:10.3390/coatings11040465.
22. Pivkin, P.M.; Grechishnikov, V.A.; Minin, I.V.; Ershov, A.A.; Voronin, V.; Nadykto, A.B.; Grigoriev, S.N. A New Approach for Controlling of Curved Cutting Edges of Toroid-Shaped End-Milling Cutter.; SPIE: Online Only, United States, April 12 2021; p. 9.
23. Pivkin, P.M.; Nadykto, A.B.; Grechishnikov, V.A.; Volosova, M.A.; Minin, I.V.; Grigoriev, S.N. A New Method for Modeling Edges of a Toroidal Cutting Surface of Solid Ceramic End Mills. In Proceedings of the Proc. SPIE; Online Only, United Kingdom, September 20 2020; Vol. 11540, p. 115401G.

# ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ЗОНДИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСА ПРИ ОТРАЖЕНИИ И ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ СРЕДЫ С НЕЛИНЕЙНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян

Тверской государственный технический университет, г.Тверь, Российская Федерация  
170026, Тверь, наб. Аф.Никитина, 22

Tel.: (+7 4822)78-91-90, e-mail: Григорий Иванов [ivanovgrigoriy@mail.ru](mailto:ivanovgrigoriy@mail.ru)

Настоящая работа посвящена проблеме повышения возможностей звуколокационной съемки сапропелевых и иных месторождений. Методами математического моделирования исследованы спектры отраженных и преломленных импульсов для различных видов минеральных и органоминеральных грунтов. Учтены характерные зависимости коэффициентов поглощения от частоты. Зондирующий импульс упругих или электромагнитных колебаний при отражении и преломлении на границе с нелинейной средой, обладающей поглощением энергии этих колебаний, претерпевает определенные изменения спектрального состава. Поскольку каждая нелинейная среда обладает собственными параметрами, обусловленными акустическими и электрическими свойствами данной среды, то изменения спектрального состава зондирующего импульса при отражении и преломлении в среде могут служить ее характеристикой (идентификацией).

Если в непоглощающей среде зондирующий импульс на временном интервале от 0 до  $\tau$  задан некоторой функцией  $f(t)$ , то отраженный импульс можно представить в виде

$$f_{от}(t) = f(t) \cdot K,$$

где  $K = ke^{-i\beta t}$  – комплексный коэффициент отражения от границы нелинейной среды;  $\beta$  – коэффициент затухания колебаний в данной среде.

Преломленный в нелинейной среде импульс можно представить следующим образом

$$f_{пр}(t) = f(t) \cdot (1 - K)e^{-\alpha h},$$

где  $\alpha = \frac{\beta}{v}$  – коэффициент поглощения энергии колебаний в среде;  $v$  – скорость распространения колебаний в данной среде;  $h$  – расстояние, пройденное преломленным импульсом.

Для каждой нелинейной среды зависимость коэффициента поглощения или затухания от частоты колебаний имеет свой вид. Для метаморфических и осадочных скальных горных пород зависимость  $\alpha$  от частоты ( $\omega$ ) может быть вида  $\alpha \sim \omega$  или  $\alpha \sim \omega^2$ . Для сапропелей пресноводных озер, по результатам наших исследований, она имеет следующий вид  $\alpha \sim \sqrt{\omega}$ .

В ходе численных экспериментов были рассчитаны текущие спектры зондирующего импульса, заданного отрезком синусоиды  $f(t) = A \sin(\omega t)$  на временном интервале от 0 до  $\tau$ , а также отраженного и преломленного импульсов для различных нелинейных сред.

Изменения спектрального состава отраженного и преломленного импульсов показывают, что спектральный анализ является эффективным методом изучения свойств вещества. Применение спектрального анализа в практике сейсмоакустических исследований торфа и сапропеля позволит значительно расширить возможности этих методов. Например, определять вид, некоторые свойства сапропеля и торфа в полевых условиях в процессе звуколокационной и радиолокационной съемки.

# ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

**Н.Н. Карабутов**

РТУ МИРЭА, Москва, Россия

119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

e-mail: [kn22@yandex.ru](mailto:kn22@yandex.ru)

Проблема структурной идентифицируемости нелинейных систем стала рассматриваться в начале настоящего столетия. Это связано с усложнением систем, явлений и процессов. Их изучение связано с построением математических моделей. В условиях неполной информации одним из подходов к синтезу моделей является идентификационный подход, основанный на анализе экспериментальной информации. При этом возникает задача структурной идентифицируемости (СИ). До настоящего времени не было разработано подходов к получению условий СИ. Это связано со сложностью рассматриваемой проблемы и отсутствием формализованных методов для ее оценки. На ее решение оказывают влияние решение таких задач как наблюдаемость, восстанавливаемость и обнаруживаемость системы.

В докладе излагается подход к оценке СИ нелинейных систем с одним входом и одним выходом на основе анализа специального класса геометрических структур  $S_{ey}$ , отражающих состояние нелинейной системы. Излагается метод построения  $S_{ey}$ . Рассматриваются требования к входу системы, гарантирующие возможность построения значимых геометрических структур. Выполнение требований к входу системы гарантирует выполнение условия S-синхронизируемости нелинейной системы, которое гарантирует возможность решения рассматриваемой задачи. Эта задача напрямую связана с возможностью структурной идентификации нелинейной части системы. Решение указанных проблем основано на анализе свойств геометрической структуры  $S_{ey}$ .

На СИ существенное влияние оказывает структура рассматриваемой системы, способы расположения нелинейности. Подходы к решению задачи зависят от класса нелинейности. В докладе рассматриваются симметричные и несимметричные нелинейности. Основное внимание уделено структурной идентифицируемости симметричных нелинейностей. Приводятся критерии принятия решения о СИ и оценка степени идентифицируемости, основанная на параметрах  $S_{ey}$ .

Дано развитие полученных результатов на системы с несимметричными нелинейностями. Показано, при каких условиях к анализу СИ системы с несимметричными нелинейностями можно применить полученные результаты для системы с симметричными нелинейностями. Приводятся примеры оценки структурной идентифицируемости нелинейных систем.

## **СОЦИОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Карлова Татьяна Владимировна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия  
127055, Вадковский пер., д. 3а  
Тел.: +7 (903)776-90-78, e-mail: karlova-t@yandex.ru

**Бекмешов Александр Юрьевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия  
127055, Вадковский пер., д. 3а  
Тел.: +7 (926)582-34-35, e-mail: b-a-y-555@yandex.ru

**Михайлова Марианна Валерьевна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия  
127055, Вадковский пер., д. 3  
Тел.: +7 (903)192-55-65, e-mail: [mari.mikhaylova@list.ru](mailto:mari.mikhaylova@list.ru)

**Тихомиров Алексей Эдуардович**

Федеральное государственное автономное учреждение науки Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук  
г. Москва, Россия  
127055, Вадковский переулок, д. 18, стр. 1А  
Тел.: +7 (962)959-99-96, e-mail: alexey.tikhomirov@list.ru

Требования к проектированию и изготовлению конкурентоспособных изделий в современных условиях импортозамещения ставят перед отечественными предприятиями следующую актуальную задачу:

- выпуск наукоемкой продукции с одновременным обеспечением интеллектуальной информационной безопасности на основе автоматизированной системы управления интеграцией и оптимизацией технологических и человеческих ресурсов.

Общей характеристикой развития науки о комплексной системе управления качеством является путь от пассивного контроля к комплексной автоматизации формирования и оценки информации о качестве конкурентной технологической производственной среды. В зависимости от темпов технического прогресса, соответствующие методы должны модифицироваться и совершенствоваться, а, следовательно, возникает опасность утечки авторской информации. В связи с этим, одним из важных подходов является социодинамический анализ в управлении автоматизированными технологическими процессами в условиях обеспечения информационной безопасности.

Экспертная оценка выбора наиболее инвариантного метода обработки информации заключается в разработанных вариантах комплексного обеспечения качества технологической производственной среды. Проблема заключается в построении дополнительных структур к основной системе управления, влияние которых на динамику процессов управления частично или полностью компенсировано.

Решение проблемы может быть достигнуто с учетом построения дополнительных функциональных модулей с использованием принципа оптимальности Беллмана в процессах развития информационной безопасности и кадровых коммуникаций.



Рис. 1 – Структура оценки степени защищенности при проектировании комплектов новых видов импортозамещающих образцов

Структура оценки степени защищенности при проектировании комплектующих новых видов импортозамещающих образцов (рис. 1) включает создание опытного образца и подсистем защиты информации, которые делятся на автоматизированную систему управления проектами и социодинамическую систему кадровых интеллектуальных ресурсов.

Электронная среда включает подсистемы баз данных, моделей представления схем функционирования и методов идентификации и оптимизации. Социодинамическая среда содержит подсистемы баз знаний, моделей представления экспертных знаний и методов обработки экспертной информации. Необходимо оценить степень интеллектуальной защищенности по методу Беллмана.

Для комплексного решения задачи по динамическому программированию применяется метод Ричарда Беллмана, позволяющий оптимизировать разнородные виды объектов, которые состоят из зависимых и влияющих друг на друга подсистем. Принцип осуществляет оптимизацию решений в многофакторных нелинейных задачах.

Допустим, технологический процесс (ТП) по производству комплектующих импортозамещающих деталей  $TexPr$  состоит из  $N$  технологических операций:

$$\overline{TexPr} = \{Op_i \mid i = 1, \dots, N\} \quad (1)$$

Каждая из технологических операций  $Op_i$  допускает выбор одного из  $M_i$  допустимых технологических режимов (ТР)  $TR_{i \xi_{ik} k}$  обработки продукции, производимой на одном из определенных видов оборудования,  $\xi_{ik} \in 1, \dots, |\xi_i|$  – код оборудования из справочника:

$$Op_i = \{TR_{i \xi_{ik} k} \mid k = 1, \dots, M_i\}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Операции  $Op_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  ТП (1) выполняются последовательно.

При этом вся стоимость технологических режимов включает в себя стоимость применяемых ресурсов.

Определение оптимального сочетания технологических режимов производственного процесса, включая стоимость временных затрат и минимальную степень риска потери интеллектуального ресурса, может быть достигнуто при помощи интегрированной математической модели Беллмана, позволяющей минимизировать затраты на обеспечение безопасности информационной системы.

### Список литературы

1. Tatyana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov, Natalia M. Kuznetsova. Protection the Data Banks in State Critical Information Infrastructure Organizations / Proceedings of the 2019 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), Sochy, Russia // Proceedings Edited by S. Shaposhnikov, St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2019, ISBN 978 1 7281 2594 7
2. Кузнецова Н.М., Карлова Т.В., Бекмешов А.Ю. Классификация компьютерных атак на автоматизированные системы промышленных предприятий Периодический научно-практический журнал «Качество. Инновации. Образование» - №4 (162) июль



- август, 2019. – М.: ФГУП Издательство «Известия» УД ПРФ, 2019. – С. 54 – 59. ISSN: 1999-513X. DOI: 10.31145/1999-513x-2019-4-54-59
3. Хорев П.Б. Программно-аппаратная защита информации: учеб. пособие / П.Б. Хорев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ : ИНФА-М, 2019. 352с. – (Высшее образование) ISBN 978 5 00091 709 1 (ФОРУМ)
  4. Кузнецова Н.М., Карлова Т.В. Основные принципы защиты автоматизированных систем крупных промышленных предприятий от комплексных кибер-атак Научно-технический журнал «Вестник Брянского государственного технического университета» №4 (57) 2017 // Изд-во Брянского государственного технического университета, 2017, с. 84-89. DOI: 10.12737/issue\_5a02f9f7150658.06648590
  5. Новиков, Ф. А. Дискретная математика для программистов : учебник. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 368 с.
  6. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений: учебник. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
  7. Борчик, Е. М. Метод управления процессом производства продукции на основании принципа оптимальности Беллмана / Е. М. Борчик, А. И. Якимов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. : В 2 ч.; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]; Могилев, 18–19 апреля 2013 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – Ч. 1. – С. 193–194.

# ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ РАСЧЕТЕ КОЛИЧЕСТВА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПРИ НАНЕСЕНИИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

А.Ю. Катков

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация  
127055, Вадковский пер., 3А

Тел.: 89036710094, e-mail: [katkovalex@mail.ru](mailto:katkovalex@mail.ru)

**Аннотация:** В данной работе обосновывается выбор математической модели для описания и расчёта количества твёрдых отходов при нанесении износостойкого покрытия TiAlN методом осаждения из газовой фазы.

**Ключевые слова:** составление математической модели, степенная математическая модель, нанесение износостойких покрытий.

Нанесение износостойких покрытий на металлорежущий инструмент методом осаждения из газовой фазы сопровождается выпадением твердых отходов в вакуумной камере. Для уменьшения их количества необходимо подобрать оптимальный режим нанесения. Начальным этапом такого подбора является построение математической модели.

Математическая модель технологического процесса – это система величин и отношений между ними, отражающая некоторые свойства технологического процесса [1]. На основе анализа литературных источников [2, 3] были определены параметры технологического процесса, влияющие на количество твердых отходов. Ставилась задача составления модели позволяющей рассчитать их количество.

С этой целью была проведена серия опытов. Начальными условиями были: температурный режим 300 °С, материал подложки – сталь 40Х, материал покрытия TiAlN. Из экспериментальных данных были получены закономерности количества твердых отходов от следующих величин: ток на катоде, напряжение источника, парциальное давление реакционного газа в вакуумной камере. Таким образом, масса пыли зависит от трех факторов:  $I$  – тока,  $U$  – напряжения и  $p$  – давления в вакуумной камере. Эти величины лучшим образом связывает зависимость степенного вида (1).

$$m = C \cdot I^\alpha \cdot U^\beta \cdot p^\gamma \quad (1),$$

где  $m_p$  – расчётная масса отходов,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – коэффициенты, показывающие степень влияния параметров,  $C$  – поправочный коэффициент, зависящий от выбранных условий обработки: материал подложки, материал наносимого покрытия, температурный режим и т.д.

Для определения степенных коэффициентов была проведена аппроксимация графическим методом [4]. Расчёт поправочного коэффициента производился по формуле (2):

$$C = \frac{m_0}{I^\alpha \cdot U^\beta \cdot p^\gamma} \quad (2),$$

где  $m_0$  – масса отходов, полученная на основе экспериментальных данных. Расчётные коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – определены логарифмированием при аппроксимации.

Проверочный расчёт по формуле (1) с учётом полученных степенных коэффициентов и поправочного коэффициента С показал погрешность в 1%.

#### **Список литературы:**

1. Математическое моделирование и методы оптимизации: Учебное пособие / Ф.Г. Ахмадиев, Р.М. Гильфанов. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2017. – 178 с
2. Григорьев С.Н., Метель А.С., Фёдоров С.В. Модификация структуры и свойств быстрорежущей стали путём комбинированной вакуумноплазменной обработки // Металловедение и термообработка металлов. – 2012. – № 1. – С. 9–14 с
3. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые покрытия / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, С. Н. Григорьев. - Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010.- 317 с
4. Гатауллина Е.В., Беляева М.Б. Классификация математических моделей // Научный журнал. 2022. №3 (65). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-matematicheskikh-modeley> (дата обращения: 26.11.2023).

## МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПАТОГЕНЕЗА ПРОГРЕССИРУЮЩИХ СТАДИЙ РЕТИНОПАТИИ НЕДОНОШЕННЫХ

И.И. Колесниченко\*, Л.М. Балашова\*\*,\*\*\*

\*ФГБУ Институт физической химии и электрохимии  
им. А.Н.Фрумкина Российской академии наук,  
119071, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4

\*\*НП Международный научно-практический Центр пролиферации тканей

\*\*\*Российский национальный исследовательский медицинский  
университет им. Н.И.Пирогова Минздрава РФ

Tel. (8 916)885-98-51, [kolesnichenko-ii@mail.ru](mailto:kolesnichenko-ii@mail.ru)

**Аннотация.** Ретинопатия недоношенных (РН) является вазопродлиферативным заболеванием, приводящим к инвалидности по зрению. Показана принципиальная возможность применения электрохимического мультисенсорного устройства «Электронный язык», основанного на использовании метода инверсионной вольтамперометрии для оценки плазмы крови, жидкости передней камеры и стекловидного тела пациентов в целях медицинской диагностики. Образцы плазмы крови детей, больных катарактой и ретинопатией недоношенных с количественным определением Т-регуляторных клеток CD4+CD25highFoxp3+CD127low по-разному влияют на характер инверсионных вольтамперограмм. Это дает возможность разработать методику оценки состояния плазмы крови у детей с офтальмопатологией.

**Ключевые слова:** офтальмология, мультисенсорная инверсионная вольтамперометрия, Т-регуляторные клетки CD4+CD25highFoxp3+CD127low, плазма крови, жидкость передней камеры, стекловидное тело, ретинопатия недоношенных,

Ретинопатия недоношенных (РН) является вазопродлиферативным заболеванием, приводящим к инвалидности по зрению. В ИФХЭ РАН разработан электрохимический метод анализа органических веществ- мультисенсорная инверсионная вольтамперометрия (МИВ)[1]. В отличие от существующих мультисенсорных систем в разработанном методе используется один индикаторный электрод, а роль сенсоров выполняет набор катионов металлов, находящихся в растворе (тест-система). Анализируемые органические вещества образуют с металлами комплексы, а методом инверсионной вольтамперометрии определяется изменение активности катионов металлов, что дает возможность определять концентрацию органических веществ. Поскольку в растворе находится несколько металлов, то это дает возможность определять одновременно ряд органических веществ.

**Целью** явилось исследование плазмы крови, жидкости передней камеры глаза и стекловидного тела детей до 1 года жизни с ретинопатией недоношенных (РН), катарактой и здоровых доношенных детей с помощью метода **мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии** (электронного носа) в сочетании с исследованием Т-регуляторных клеток и антиVEGF-фактора в крови.

Измерения проводились в растворе 0.05M KCl, содержащем катионы  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Co^{3+}$ ,  $Hg^{2+}$  в концентрации 5·10<sup>-5</sup>M. В этом растворе снималась фоновая инверсионная вольтамперограмма в отсутствии пробы. При контакте органических соединений с металлами тест-системы образуются комплексы. Эти изменения в составе раствора фиксируются инверсионной вольтамперограммой [2-6]. При определении неизвестных органических веществ необходимо провести поиск оптимального соотношения между концентрациями тест- системы и органическими веществами. В ряде случаев большие концентрации металлов тест-системы могут быть нежелательны, поскольку при электроосаждении на электроде могут образовываться сплавы и в связи с этим чувствительность определения органических веществ может уменьшаться. Всего было обследовано 118 детей (232 глаза) в возрасте до 1 года. Из них 79 детей (158 глаз) детей с ретинопатией недоношенных, 12 детей (20 глаз) с врожденной катарактой и 27 здоровых доношенных детей (54 глаза) того же возраста. Детям были произведены типичное **офтальмологическое** обследование. Исследование **T-регуляторных клеток CD4+CD25highFoxp3+CD127low** было проведено у 79 недоношенных детей с ретинопатией и 27 здоровых доношенных детей того же возраста. Особое внимание нами было уделено исследованию T- регуляторных клеток CD4+CD25highFoxp3+CD127low Исследование произведено совместно с профессором С.Н.Быковской в Отеле клеточных технологий и регенеративной медицины ФГБОУ ВО РНИМУ им. Н.И.Пирогова Минздрава России. Произведено иммунофенотипирование клеток периферической крови, включая T регуляторные клетки (T-reg):

1. Забор крови у детей из вены на операционном столе во время оперативного вмешательства под общим обезболиванием. Периферическую кровь отбирали в пробирки с антикоагулянтом K3EDTA (Greiner Bio One, Austria).

2. Лизирование эритроцитов производили при помощи лизирующего буфера Red Blood Cell Lysing buffer (Life technologies, США) по протоколу производителя. Клетки в количестве 5 x 10<sup>6</sup> из осадка ресуспендировали в 200 мкл фосфатного буферного раствора.

3. T-reg клетки периферической крови пациентов и доноров метили при помощи Treg detection staining cocktail (Miltenyi Biotec, Германия) по протоколу производителя. Количество Treg определяли методом проточной цитометрии на цитометре MACS Quant (Miltenyi iBiotec). Исследование экспрессии гена VEGF A производилось с использованием стандартной программы в ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И.Пирогова Минздрава России

### **Результаты и их обсуждение.**

Приведены результаты исследования количества T-регуляторных клеток CD4+CD25highFoxp3+CD127low в крови и данных мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии в плазме крови, жидкости передней камеры и стекловидном теле. На рисунке 1 построенная линия тренда указывает на значительное снижение количественного показателя T- регуляторных клеток практически во всех стадиях, кроме ЗАРН по сравнению с контролем, и особенно во II (как далее будет представлено, во II+) и V стадиях заболевания. Обращает на себя внимание, что у больных с задней агрессивной формой заболевания, обнаруживаемой в достоверно более ранние сроки ( $p < 0,01-0,05$ ) по сравнению с другими стадиями РН, T-регуляторные клетки CD4+CD25highFoxp3+CD127low выявляются чаще в немного

повышенных и нормальных количествах в отличие от остальных стадий ретинопатии ( $p < 0,05$ ), хотя встречаются больные и с пониженными значениями (рис.1–3). Можно предположить, что задняя агрессивная форма РН имеет и другие ведущие патогенетические механизмы, возможно связанные с генетическими нарушениями.

### PCR Quantification Data

#### PCR Amp/Cycle Chart

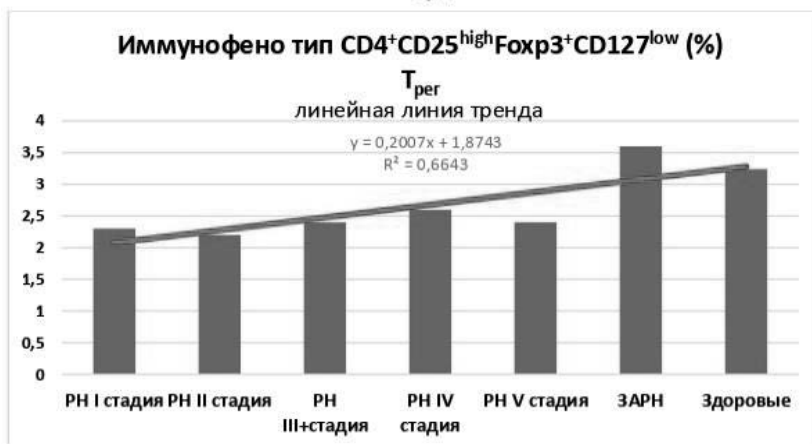
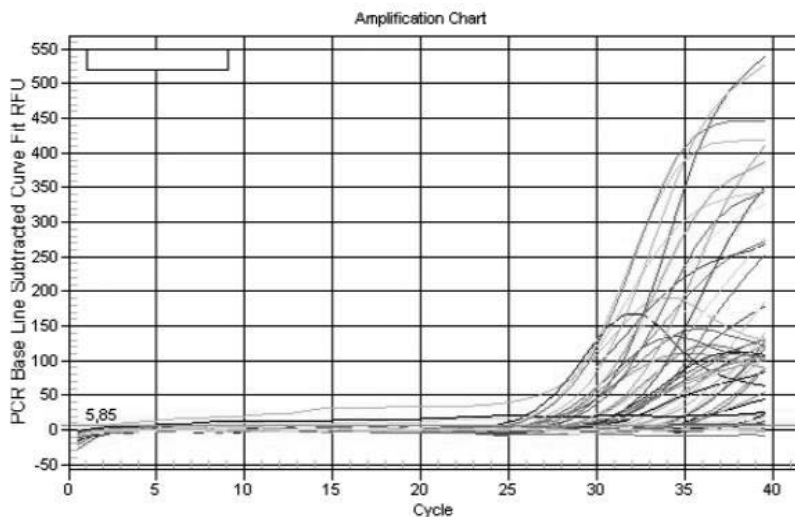


Рис. 1. Линейная линия тренда  $T_{reg}$  ( $CD4^+CD25^{high}Foxp3^+CD127^{low}$ ) для всех форм РН по сравнению с контрольной группой

При статистической обработке полученных результатов использовался критерий Стьюдента и модуль «Вероятностный калькулятор».

Как показано на рисунках 2 А, Б, при использовании критерия Стьюдента определяется пограничная достоверность при сравнении количества Т-регуляторов при сравнении непрогрессирующих и прогрессирующих I и II стадий РН ( $p < 0,046$  и  $p < 0,07$ ). На коробчатых (усиковых) диаграммах представлены эти различия. При использовании модуля «Вероятностный калькулятор» определена достоверная разница между этими значениями ( $p = 0,02$  и  $p = 0,03$ ). На рисунке 3 представлены результаты исследования уровней VEGF F в крови у детей с РН и катарактой.

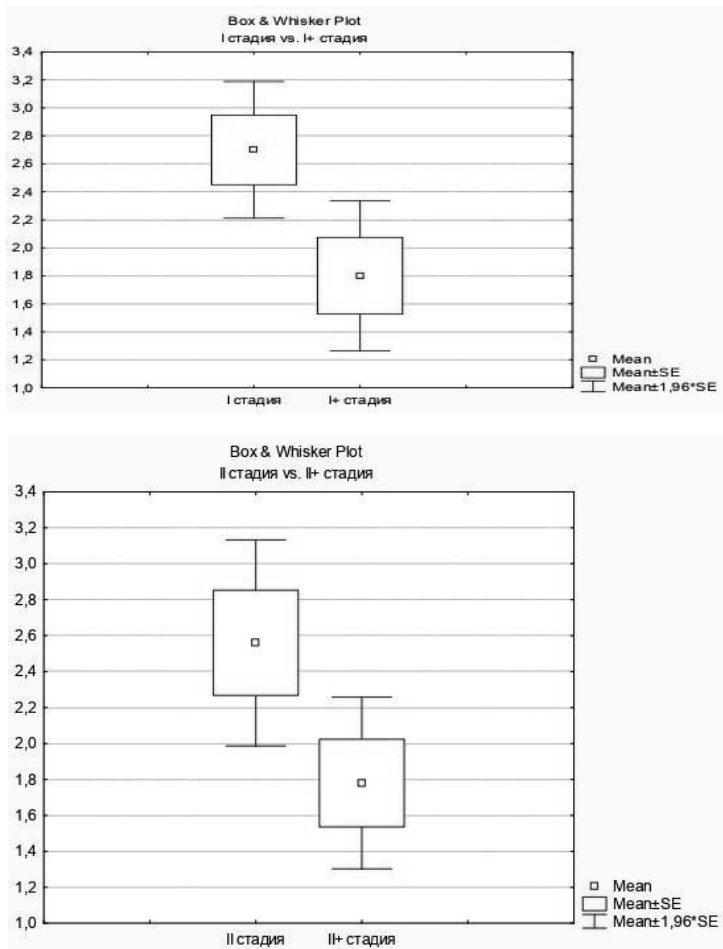


Рис.2 А, Б. Количество Т-регуляторов с начальными (I и II) стадиями ретинопатии недоношенных (кубич. диаграммы)

Как показано на рисунке 3, высокие уровни экспрессии гена VEGF A в крови детей с РН значительно превышают уровни этого фактора роста у больных детей с катарактой ( $p<0,01$ ). Образцы плазмы крови детей с РН, а также плазмы детей, больных катарактой, по-разному влияют на пики токов, растворенных металлов (Рис.4).

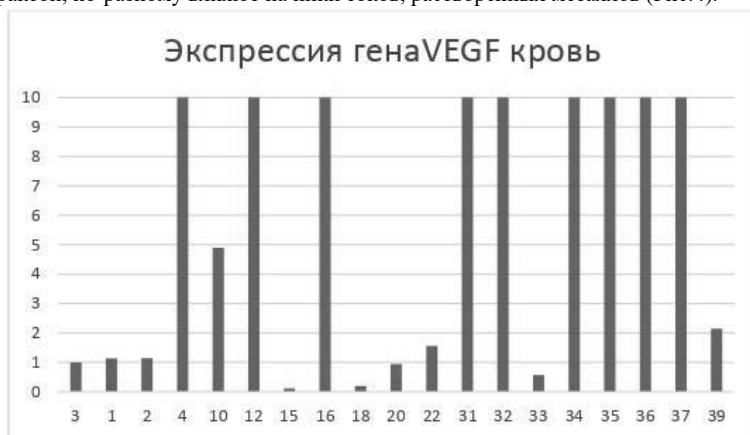


Рис.3. Уровни экспрессии гена VEGF A у детей с активной ретинопатией недоношенных и катарактой (3, 1, 2, 15, 18, 22, 33) ( $p<0,01$ ).



Рис.4. Пики токов растворения металлов у детей с ретинопатией недоношенных



Образцы плазмы крови детей с РН, а также плазмы детей, больных катарактой, по-разному влияют на характер инверсионных вольтамперограмм тест-системы.

Из кривых видно, что образцы плазмы крови новорожденных детей больных катарактой и ретинопатией недоношенных по-разному влияют на характер инверсионных вольтамперограмм (пики токов растворения металлов)

Вид вольтамперограмм жидкости передней камеры глаза и стекловидного тела детей с РН и катарактой представлены на рисунках 5 и 6.

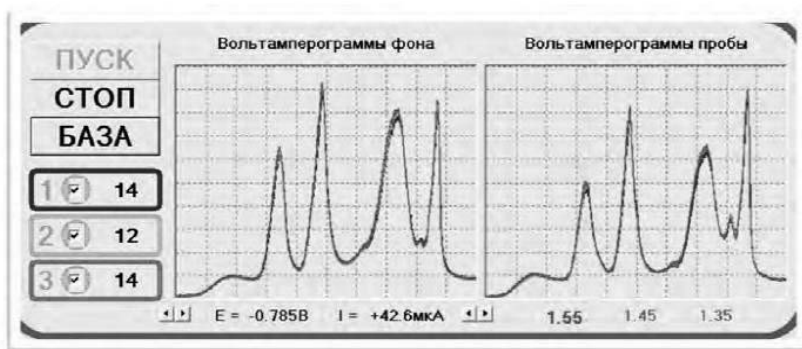


Рис.5. Вид вольтамперограмм слева – тест-система, справа – влияние жидкости передней камеры пациента на тест-систему.

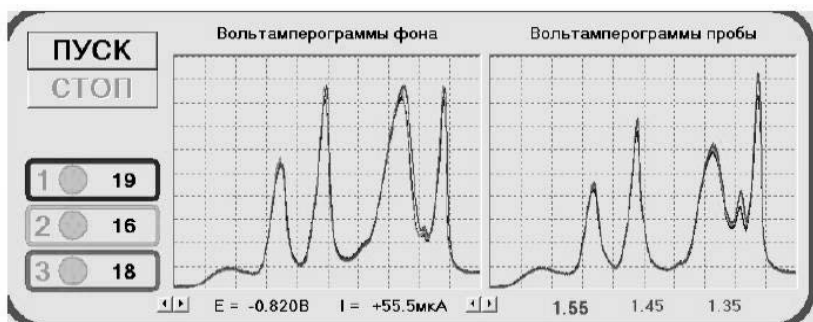


Рис.6. Вид вольтамперограмм слева – тест-система, справа – влияние стекловидного тела пациента на тест-систему.

Вольтамперограмма – зависимость тока от потенциала рабочего электрода, меняющегося по линейному закону во времени. Пики соответствуют окислению металлов тест-системы. Цифровые значения (453 точки) поступают в программу для последующей обработки в виде файла, из которого извлекаются значения тока.

Вольтамперограмма разбивается на  $N$  участков, количество которых зависит от сложности исследуемой системы. Таким образом формируется  $N$ -мерный образ высотой пиков тока объекта. Как очевидно, вольтамперограммы значительно

различаются при исследовании богатой белками плазмы крови (пики токов несколько ниже, чем при исследовании сыворотки крови), жидкости передней камеры и стекловидного тела по высоте пиков тока (соответствующих, вероятно, образованию комплексов с ионами различных металлов).

### **Заключение.**

Показана принципиальная возможность применения электрохимического мультисенсорного анализа, основанного на методе инверсионной вольтамперометрии в формате “Электронный нос”, и выявлены различия при исследовании плазмы крови, жидкости передней камеры и стекловидного тела в целях медицинского скрининга офтальмопатологии. Вольтамперограммы сыворотки крови и слезной жидкости также существенно отличаются друг от друга, но эти жидкости не исследовались у детей до года.

### **Выводы.**

1. У больных с ретинопатией недоношенных обнаружено достоверное уменьшение количества Т-регуляторных клеток CD4+CD25highFoxp3+CD127low. При прогрессирующих стадиях РН определяются, как правило, более низкие значения, чем при стационарных. Данные изменения могут свидетельствовать о роли аутоиммунных реакций в патогенезе ретинопатии недоношенных.

2. Задняя агрессивная ретинопатия недоношенных чаще протекает на фоне показателей клеточного иммунитета, несколько повышенных или мало отличающихся от нормальных в отличие от остальных стадий ретинопатии ( $p < 0,05$ ). Это «другая форма» ретинопатии недоношенных, причину которой нужно искать в том числе в генетических нарушениях.

3. Выявлено, что высокие уровни экспрессии гена VEGF A в крови детей с РН значительно превышают уровни этого фактора роста у больных детей с катарактой ( $p < 0,01$ ).

4. Показана принципиальная возможность применения электрохимического мультисенсорного устройства «Электронный язык», основанного на использовании метода инверсионной вольтамперометрии, в целях медицинской диагностики.

Вольтамперограммы плазмы крови, жидкости передней камеры и стекловидного тела существенно различаются.

### **Список литературы**

1. Андреев В.Н., Ганшин В.М., Доронин А.Н., Луковцев В.П. Способ электрохимического мультисенсорного обнаружения и идентификации алкалоидов. Патент РФ №2375705, Оpubл. 10.12.2009.
2. Колесниченко И.И., Ключев А.Л., Ганшин В.М., Кантаржи Е.П. и др. Экспресс-скрининг биологических объектов с использованием мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии с распознавания образов // Методы исследования физико-химических систем по защите металлов и физической химии поверхностей. 2014, Т.50, №4, С.543-547.
3. Kolesnichenko I.I., Balachova L.M., Kantarzhi E.P. Express Screening of Biological Objects Using Multisensor Stripping Voltamperometry with Pattern Recognition // American Journal of Analytical Chemistry, 2016, №7, P. 588-596

4. A Multisensory Stripping Voltammetry Method for Analysis of the Generic Anti-Glaucoma. Drug Betoptic. L. M. Balashova, I. I. Kolesnichenko, V. A. Namiot, A. N. Doronin, *Biophysics*, 2019, Vol. 64, No. 6, pp. 885–889.
5. .Определение визомитина методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии. Балашова Л.М. Колесниченко И.И., Кантаржи Е.П. // Клиническая геронтология. 2017г, Т.23 № 9-10, с.6-8.
6. Determination of Ropivacaine in Lacrimal Fluid of Children under Conduction Anesthesia by Multisensory Stripping Voltammetry . Balashova L.M., Namiot V.A., Kolesnichenko I.I., Korobova L.S., Kuznetsova Yu D., *Biophysics*, 2022, Vol 67, No 1, pp. 111-115.

# ОБЗОР СИСТЕМ СМЕНЫ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

М.Д. Коновалов

## MACHINE LEARNING BASED LANE CHANGE SYSTEMS REVIEW

M.D. Konovalov

Institute for Design-Technological Informatics RAS, Moscow, Russia

127055, Vadkovskii lane, 18a, building 1

Tel.: (+7 985)777-54-93, e-mail: [m.konovalov98@yandex.ru](mailto:m.konovalov98@yandex.ru)

На сегодняшний день наблюдается интерес к использованию автономного транспорта как на закрытых площадках, так и на дорогах общего пользования. В связи с этим возникает необходимость в разработке системы управления, способной работать в условиях стандартного трафика, в сложных дорожных условиях при соблюдении необходимого уровня экономичности и безопасности. Одной из основных подсистем высокоуровневой системы управления автономным транспортом является система смены полосы движения. Примерно 10 процентов аварий на дорогах общего пользования случается в процессе перестроения. В связи с этим задача безопасного и плавного перестроения транспортного средства является одной из ключевых. В качестве основных проблем при перестроении можно выделить:

- 1) Неопределённость поведения других участников дорожного движения;
- 2) Наличие большого количества возможных манёвров.

Существует несколько подходов к решению данной задачи: подход, основанный на, алгоритме роя частиц, подход, основанный на теории игр, подход, в основе которого лежит метод предсказания траекторий движения других транспортных средств с помощью рекуррентных нейронных сетей и подход, основанный на обучении с подкреплением.

**Цель работы:** Провести анализ методов решения задачи смены полосы движения автономным транспортом.

**Результаты:** Метод, основанный на рое частиц даёт хорошие показатели по количеству столкновений и средней скорости, но крайне зависим от изначальных гиперпараметров. Теория игр также даёт прекрасные результаты, но главным допущением является то, что все участники обладают рациональным поведением. В случае метода, основанного на рекуррентных нейронных сетях, мы получаем алгоритм, который учитывает перспективное перемещение других участников движения, но он крайне ограничен в выборе манёвров транспортного средства, принимающего решения о перестроении. Методы, основанные на глубоком обучении с подкреплением, являются наиболее гибкими и дают наибольшую вариацию манёвров, но они сильнее всех зависимы от среды обучения. Также, можно заключить, что методы, основанные на глубоких нейронных сетях, требуют наличия высокоэффективных графических вычислителей.

Таким образом можно заключить, что алгоритмы, комбинирующие рекуррентные сети для предсказания траекторий перемещения других участников движения, и обучение с подкреплением, способны дать методы перестроения, с нивелированием недостатков двух подходов.

### Список литературы

1. S. Hetrick. "Examination of driver lane change behavior and the potential effectiveness of warning onset rules for lane change or "side" crash avoidance systems," Dissertation, Virginia Polytechnic Institute & State University, 1997.
2. N. Wiesner, J. Sheppard and B. Haberman, "Using Particle Swarm Optimization to Learn a Lane Change Model for Autonomous Vehicle Merging," 2021 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), Orlando, FL, USA, 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/SSCI50451.2021.9660094.
3. Arbis, David and Vinayak V. Dixit. "Game theoretic model for lane changing: Incorporating conflict risks." *Accident; analysis and prevention* 125 (2019): 158-164 .
4. Liu, Shuncheng & Su, Han & Zhao, Yan & Zeng, Kai & Zheng, Kai. (2021). Lane Change Scheduling for Autonomous Vehicle: A Prediction-and-Search Framework. 3343-3353. 10.1145/3447548.3467072.
5. Das, Lokesh Chandra & Won, Myounggyu. (2021). SAINT-ACC: Safety-Aware Intelligent Adaptive Cruise Control for Autonomous Vehicles Using Deep Reinforcement Learning.
6. J. Wu, W. Huang, N. de Boer, Y. Mo, X. He and C. Lv, "Safe Decision-making for Lane-change of Autonomous Vehicles via Human Demonstration-aided Reinforcement Learning," 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Macau, China, 2022, pp. 1228-1233, doi: 10.1109/ITSC55140.2022.9921872.
7. Huang, Mengyuan & Li, Shiwu & Guo, Mengzhu & Han, Lihong. (2021). A Decision-Making Model for Self-Driving Vehicles Based on Overtaking Frequency. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. 1-13. 10.1155/2021/5948971.

# ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СОЛИТОНОВ В ПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПОЛЕ ПЛАЗМИДЫ pPF1

Л.А. Краснобаева<sup>\*\*</sup>, Л.В. Якушевич<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

634050, пр. Ленина 36, Тел.: (3822)529021

<sup>\*\*</sup>Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия

634050, Московский тракт, 2, Тел.: (3822)901101, e-mail: [kla1983@mail.ru](mailto:kla1983@mail.ru)

<sup>\*\*\*</sup>Институт биофизики клетки Российской академии наук – обособленное подразделение  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный  
исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований  
Российской академии наук», Московская обл., г. Пушкино, Россия

142290, Институтская ул. 3, Тел.: (466)7739252, e-mail: [kind-@mail.ru](mailto:kind-@mail.ru)

Нелинейные конформационные возмущения, возникающие в молекуле ДНК в результате воздействия различных внешних факторов, рассматриваются многими исследователями как солитоны, движущиеся в потенциальном поле этой молекулы.

В данной работе исследуются динамические свойства кинкообразных солитонов или просто кинков, активированных в плазмиде pPF1. Эта плаزمиды была создана недавно генами инженерами [1] и активно применяется для изучения интенсивности и направленности процесса транскрипции в различных последовательностях, которые для этой цели интегрируются в область, расположенную между генами флуоресцентных белков *Egfp* и *mCherry* (рисунок 1). Хотя большинство исследователей рассматривают плазмиды, в том числе и плазмиду pPF1, только как инструмент, она и сама по себе представляет научный интерес. Изучение ее структурных и динамических свойств поможет в перспективе прояснить вопрос о том, влияют ли структурные и динамические свойства самой плазмиды на результаты изучения функциональных свойств интегрированных в нее последовательностей.

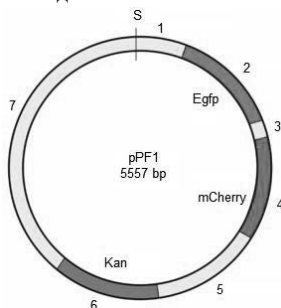


Рис. 1. Схематическое изображение плазмиды pPF1. Гены *Egfp* и *mCherry* показаны зеленым и красным цветом, соответственно. Синим цветом показан ген канамицина *Kan*. Точка *S* – начало нумерации нуклеотидной последовательности

С помощью методов нелинейной математики и теоретической физики мы получили энергетический профиль потенциального поля плазмиды. С учетом эффектов диссипации и воздействия постоянного торсионного поля были рассчитаны траектории движения кинков в плоскости  $\{v, z\}$  и 3D траектории для нулевой ( $v_0=0$ ) и ненулевой ( $v_0 = 50$  м/с) начальных скоростей кинков. Показано, что существуют пороговые значения торсионного поля, ниже и выше которых поведение кинка существенно меняется: происходит переход от циклического движения кинка внутри области, расположенной между генами флуоресцентных белков Egfp и mCherry, к поступательному движению и выходу из этой области. Таким образом, можно сделать вывод о том, что поведение кинков во многом определяются видом и характером потенциального поля плазмиды, а также величиной воздействия такого внешнего фактора как торсионное поле ДНК.

### Список литературы

1. Masulis, I.S., Babaeva, Z.Sh., Chernyshov, S.V. et al. Visualizing the activity of *Escherichia coli* divergent promoters and probing their dependence on superhelical density using dual-colour fluorescent reporter vector // Scientific Reports, v. 5, 2015, P. 11449. <https://doi.org/10.1038/srep11449>

# МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

**Кузнецова Наталья Михайловна**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИИ», г. Москва, Россия  
127055, Вадковский пер., д. 3а

Тел.: +7 (903)581-80-15, e-mail: knm87@mail.ru

Согласно исследованиям [1], современные промышленные предприятия сталкиваются с задачей обеспечения противодействия реализации атак класса АРТ (англ. Advanced Persistent Threat – комплексных кибер-атак). Основными особенностями данных атак являются целенаправленность, долгосрочность, труднодетектируемость. Также отличием АРТ от других атак является «двухфазность»: АРТ состоит из стадий «подготовки» и «обрушения».

С помощью моделирования эффективности автоматизированных систем защиты (далее – АСЗ) [2], моделей распространения вирусов (как объектов) [3], а также с помощью моделей цифровых двойников [4] с применением метода Монте-Карло [4, 5] возможно определение уровня защищенности информационных ресурсов промышленного предприятия.

На рисунке 1 представлена схема процесса моделирования уровня защищенности информационных ресурсов промышленного предприятия.

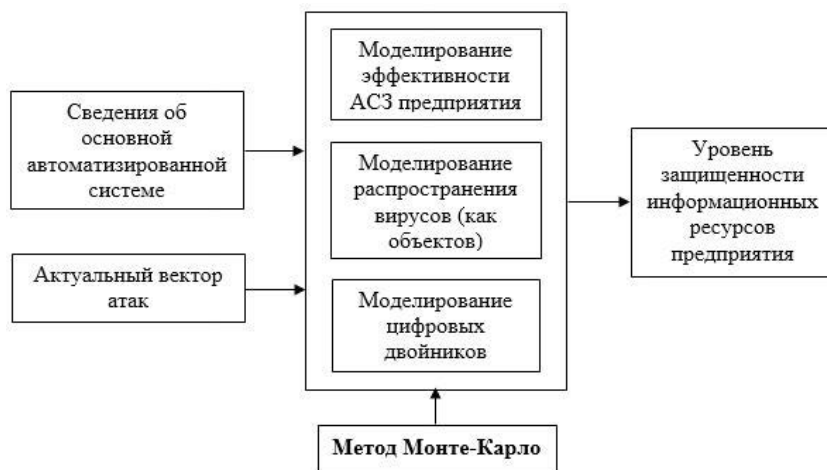


Рисунок 1 – Схема процесса моделирования уровня защищенности информационных ресурсов промышленного предприятия



Согласно рисунку 1, входными данными являются:

- информация о структуре и ресурсах основной автоматизированной системе предприятия (как объектах защиты);
- актуальный вектор угроз.

Основным механизмом моделирования является метод Монте-Карло.

При этом выходными данными является уровень защищенности информационных ресурсов предприятия.

Представленные в статье рекомендации для моделирования уровня защищенности информационных ресурсов предприятия за счет применения метода Монте-Карло позволят своевременно выявить возможные попытки реализации атак класса АРТ, а также принять управленческое решение по их предотвращению.

### Список литературы

1. Nataliya M. Kuznetsova, Tatiana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov Method of Timely Prevention from Advanced Persistent Threats on the Enterprise Automated Systems // 2022 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)
2. Kuznetsova N.M., Karlova T.V., Bekmeshov A.Yu., Sheptunov A.S. Application of Mathematical Modelling Methods for Evaluate the Efficiency of Automated Systems for the Protection of Intellectual Resources of Industrial Enterprises // The modelling of nonlinear processes and systems // The 6 International Science Conference (MNPS-2022). Conference proceedings / Под редакцией Л.А. Уваровой
3. Кузнецова Н.М., Карлова Т.В., Бекмешов А.Ю. Автоматизированное моделирование распространения инфекционных заболеваний среди населения мегаполиса с помощью метода Монте Карло с учётом аспектов информационной безопасности // Качество. Инновации. Образование. – 2020. – № 5 (169). – С. 96–102. ISSN: 1999-513X
4. Kuznetsova N.M., Karlova T.V. Application of Digital Twin Technology for Modelling of Information Security Level of Industrial Plant // EPJ Web of Conferences Volume 248 (2021), V International Conference «Modeling of Nonlinear Processes and Systems» (MNPS-2020) Moscow, Russia Published online: 26 April 2021 id.02007 <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124802007>
5. Кузнецова Н.М. Решение обратной задачи методом Монте-Карло // Материалы студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2008)». Первый тур. Сборник тезисов докладов. – М.: МГТУ «Станкин», 2008. – 103 с.

**ВЫВОД УРАВНЕНИЯ «ФУНКЦИЯ ТОКА - ВИХРЬ»  
ДЛЯ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ**

**DERIVATION OF THE EQUATION “CURRENT FUNCTION -  
VORTEX” FOR A POWER - LAW LIQUID**

Т.А. Ла, T.A La

МГТУ “СТАНКИН”, Москва, Россия

127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: (+7 900) 014-46-38, e-mail: [latuananh0407@gmail.com](mailto:latuananh0407@gmail.com)

Закономерности движения и теплообмена неньютоновских жидкостей имеют важное теоретическое значение, а также обладают значительной практической важностью. Для эффективного использования новых высокотемпературных теплоносителей требуются надёжные соотношения и расчётные формулы, касающиеся теплообмена неньютоновских жидкостей, таких как растворы и расплавы полимеров, коллоидные взвеси и композитные смеси. В статьях [4], [5] используют автоматические переменные для решения задач в частных случаях движения и теплообмена неньютоновских жидкостей. В нашей работе излагаются результаты уравнения обтекания тонких плоских пластин неньютоновской жидкостью с степенным законом и их решим с помощью переменных «функция тока и вихрь». Полученные решения позволяют оценить качество численных методов решения в частных случаях.

Обобщенные уравнения Навье-Стокса для случая течения жидкости степенным реологическом законом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{k}{\rho} \left[ A \Delta v_x + 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \frac{\partial A}{\partial y} + \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \frac{\partial A}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{k}{\rho} \left[ A \Delta v_y + 2 \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} + \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \frac{\partial A}{\partial x} + \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \frac{\partial A}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{k}{\rho} \left[ A \Delta v_z + 2 \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} + \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \frac{\partial A}{\partial x} + \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \frac{\partial A}{\partial y} \right] \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\Delta v_x$  – Лапласиан, равный  $\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}$

$$A = \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} (2)$$

Введем безразмерные координаты и скорость

$$v_x = V v_{x_0}, \quad p = P p_0, \quad x = L x_0, \quad t = T t_0$$

Делая подстановку, легко получить для левой части уравнения (1) для x

$$\frac{V}{T} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial t_0} + \left( \frac{V}{L} \right)^2 \left( v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} + v_{z_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial z_0} \right) (3)$$

В правую часть входит А. Поскольку во второй инвариант входит квадраты части производных

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)^2 = \left(\frac{V}{L}\right)^2 \left(\frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0}\right)^2$$

$$\Rightarrow A = \left(\frac{V}{L}\right)^{n-1} A_0$$

Производные от А запишутся

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{V}{L} \left(\frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0}\right)^{n-1} \frac{\partial A_0}{\partial x_0}$$

Лапласиан  $\Delta v_x$  равен

$$\Delta v_x = \frac{V}{L^2} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0}$$

Поставим эти в уравнение (1) для x, и получим после некоторых преобразований

$$\frac{V}{T} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial t_0} + \left(\frac{V}{L}\right)^2 \left( v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} + v_{z_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial z_0} \right) = g \cos(g, x) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x_0} + \frac{k}{\rho} \frac{V}{L^2} \left(\frac{V}{L}\right)^{n-1} \left[ A_0 \Delta v_{x_0} + 2 \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} \frac{\partial A_0}{\partial x_0} + \left( \frac{\partial v_{y_0}}{\partial v_{x_0}} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial v_{y_0}} \right) \frac{\partial A_0}{\partial v_{y_0}} + \left( \frac{\partial v_z}{\partial v_{x_0}} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial v_z} \right) \frac{\partial A_0}{\partial v_z} \right]$$

Давайте разделим все члены этого уравнения на множитель, соответствующий безразмерному конвективному ускорению  $V^2/L$ . После этого преобразования уравнение примет вид, учитывающий множитель перед фигурной скобкой в правой части

$$\frac{L}{VT} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial t_0} + v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} + v_{z_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial z_0} = \frac{Lg}{V^2} g \cos(g, x) - \frac{P}{\rho V^2} \frac{\partial p_0}{\partial x_0} + \frac{k/\rho}{V^{2-n} L^2} \left(\frac{V}{L}\right)^{n-1} \left[ A_0 \Delta v_{x_0} + 2 \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} \frac{\partial A_0}{\partial x_0} + \left( \frac{\partial v_{y_0}}{\partial v_{x_0}} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial v_{y_0}} \right) \frac{\partial A_0}{\partial v_{y_0}} + \left( \frac{\partial v_z}{\partial v_{x_0}} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial v_z} \right) \frac{\partial A_0}{\partial v_z} \right]$$

### Рассмотрим движение степенной жидкости внутри пограничного слоя

Из аналогии с обтеканием тел ньютоновскими жидкостями следует, что существование пограничного слоя, как области, где силы вязкости играют основополагающую роль, также вероятно и для течения неньютоновских жидкостей. Однако из-за особенностей взаимосвязи между напряжениями сдвига и скоростями деформации в неньютоновских жидкостях возникнут определенные ограничения на применение идеи пограничного слоя.

Давайте проанализируем стационарный режим течения в условиях отсутствия массовых сил. Для этого рассмотрим уравнение движения в безразмерной форме в декартовой системе координат, проецированное на ось Oх.

$$v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} = -\frac{\partial p_0}{\partial x_0} + \text{Re} \left[ A_0 \Delta v_{x_0} + 2 \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} \frac{\partial A_0}{\partial x_0} + \left( \frac{\partial v_{y_0}}{\partial v_{x_0}} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial v_{y_0}} \right) \frac{\partial A_0}{\partial v_{y_0}} \right] \quad (5)$$

где Re – обобщенное число Рейнольдса степенных жидкостей

$$\text{Re} = \frac{V^{2-n} L^n}{k/\rho}$$

Итак, в данном случае мы предполагаем, что толщина пограничного слоя намного меньше, чем продольный размер тела  $\delta \ll L$ . Для оценки порядка членов в уравнении (5) все физические величины имеют конечные размеры, не зависящие от толщины пограничного слоя. Мы соглашаемся относиться к этим величинам как к порядку 1, то есть предполагаем их порядок единицы.

Также предполагается, что продольная составляющая скорости  $v_{x_0}$  имеет тот же порядок, что и скорость набегающего потока  $v_{x_0} \ll 1$ . Отсюда следует, что величина производных  $\frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0}$  и  $v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0}$  также будет иметь порядок 1.

Это значит, что в пределах пограничного слоя значения ординат изменяются от нуля на поверхности (стенке) до значений  $\delta$ , соответствующих размерам на внешней границе слоя. Таким образом  $y_0 \ll \delta_0$  причем  $\delta_0 = \delta/L$ .

При обработке порядка, получим уравнение

$$v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} = -\frac{\partial p_0}{\partial x_0} + \frac{1}{\text{Re}} \left[ A_0 \Delta v_{x_0} + \left( \frac{\partial v_{y_0}}{\partial x_0} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} \right) \frac{\partial A_0}{\partial y_0} \right] \quad (6)$$

В данном случае, мы оставим только те члены, порядок которых значительно больше, чем у других членов в выражении для фигурной скобки.

$$v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} = -\frac{\partial p_0}{\partial x_0} + \frac{1}{\text{Re}} \left\{ \left[ \left( \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \frac{\partial^2 v_{x_0}}{\partial y_0^2} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} \frac{\partial}{\partial y_0} \left[ \left( \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \right\} \quad (7)$$

Более компактно это выражение можно записать так

$$v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} = -\frac{\partial p_0}{\partial x_0} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial y_0} \left[ \left( \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} \right)^n \right] \quad (8)$$

Если вернуться к размерным членам, то первое уравнение плоского слоя в проекции на ось  $x$  можно записать следующим образом.

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{k}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^n \right] \quad (9)$$

Конечно, другое уравнение Навье-Стокса в проекции на ось  $y$  может быть рассмотрено аналогичным образом.

Это предположение приводит к выводу, что инерционные члены и все члены, зависящие от вязкости во втором уравнении Навье-Стокса, имеют порядок  $\delta_0$ . Из этого следует, что все эти члены можно игнорировать по сравнению с членами, имеющими порядок 1 в первом уравнении. Это означает, что градиент давления вдоль пограничного слоя также будет иметь порядок  $\delta_0$  и его можно считать равным нулю. Следовательно, давление вдоль пограничного слоя остается постоянным, и его можно принять равным давлению на внешней границе пограничного слоя, которое определяется потенциальным течением.

Таким образом, вместо второго уравнения для пограничного слоя будем иметь

$$\frac{dp}{dy} = 0 \quad (10)$$

Добавим сюда уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

Система уравнений (9)–(11) описывает движение жидкости в тонком слое непосредственно у поверхности тела, который мы и будем называть пограничным слоем степенной неньютоновской жидкости.

Уравнения пограничного слоя представляют собой нелинейные уравнения в частных производных второго порядка, и их решение аналитическим путём ограничивается немногими простыми случаями. Поэтому при их интегрировании часто прибегают к приближенным методам, основанным на численном интегрировании, а также используют интегральные соотношения для пограничного слоя. Например, при решении задачи об обтекании тонкой плоской непроницаемой пластины потоком неньютоновской жидкости часто используют различные методы решения, сочетающие численные подходы и аналитические методы для получения приближенного решения данной задачи.

Пусть бесконечно тонкая длинная пластинка обтекается однородным степенным потоком неньютоновской жидкости в своей плоскости. На поверхности пластины установим систему координат таким образом, чтобы начало координат совпадало с передней кромкой пластины, ось  $x$  направлена вдоль пластины, а ось  $y$  перпендикулярна к ней. Пусть скорость набегающего потока равна  $v$ .

Уравнение пограничного слоя для рассматриваемого случая запишется так

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{kn}{\rho} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^{n-1} \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (12)$$

С помощью этого уравнения следует добавим уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

Система (12) и (13) представляют собой уравнения движения степенной неньютоновской жидкости в пограничном слое пластины.

Рассмотрим решение этой системы в приближенной формуле и построим граничные условия.

Поскольку течение плоское, можно ввести функцию тока  $\psi(x, y)$  и вихрь  $\omega$ , такие что:

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \omega = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}$$

В результате получаем систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \frac{kn}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right)^{n-1} \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^3} \\ \omega = -\Delta \psi \\ v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \end{array} \right.$$

Таким образом, система уравнений движения жидкости внутри пограничного слоя степенных жидкостей представляет собой значительное упрощение исходных уравнений движения. Одно из этих уравнений, направленное вдоль оси,

перпендикулярной к стенке, приняло следующий вид (10). Соответственно сокращается и число неизвестных и отстает только система уравнений с двумя неизвестными составляющими скоростей  $v_x$  и  $v_y$ . Мы получим систему уравнения обтекания тонких плоских пластин неньютоновской жидкостью с переменными «функция тока и вихрь» и ее решение будет представить в дальнейшей работе.

### Список литературы

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 719с
2. Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей. М.: Энергия, 1975. 352 с.
3. Шульман З.П., Берковский Б.М. Пограничный слой неньютоновских жидкостей. Минск: Наука и техника, 1966. 283 с
4. Селиванов Н. В., Кузьмин С. И. Численное моделирование вынужденного течения в пограничном слое и теплообмена неньютоновской жидкости с учетом зависимости вязкости от температуры. Теплофизика высоких температур, 2009, том 47, № 6, с. 921-926
5. Кожанов В.С., Попова Е.В. Моделирование нестационарного пограничного слоя на плоской полубесконечной пластине в начальной стадии ее движения в неньютоновской жидкости. Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2019. №2

# ПЛЮСЫ И МИНУСЫ ЕГЭ

Л.И. Лапушкина

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1

*«Жизнь украшается двумя вещами: занятием  
математикой и ее преподаванием»*

Пуассон С.Д.

Москва, 30 сентября 2003 года, Россия перешла на Болонскую систему образования. Болонская система- это единые стандарты обучения разных государств, которые призваны создать единое Европейское пространство высшего образования. Прекрасно, с этим нельзя поспорить, но как быть с национальными интересами в рамках образовательной программы? Тестирование не обладает точностью при оценке знаний, умений и навыков учащихся. Отсутствие системного подхода и методологии при обучении студентов и, как следствие, узость знаний и компетенции. Таким образом в России выявились недостатки, такие как риск потери ценного образовательного опыта в истории высшего национального образования: практическая недееспособность некоторых новаций процесса, ограниченная доступность студентов к магистратуре. Снижение уровня высшего образования из-за ориентации на узких специалистов, в ущерб фундаментальной подготовке, развивающей аналитическое и критическое мышление. При введении ЕГЭ в России в 2019 году предполагалось: 1.Равные условия для всех учеников 2.Уменьшение коррупции в вузах. 3 Приближение к международным стандартам. Что получили? 1.Не учитываются индивидуальные особенности ученика. 2 Усиление коррупции в школе. 3. Снижение роли учителя в оценки знаний ученика. Убрав одну коррупционную составляющую, ЕГЭ привело к появлению другой, увеличилось количество подложных сдач экзаменов учителями или студентами вместо учеников, возникло репетиторство конкретно к ЕГЭ. Из года в год набор стандартных задач, натаскивание на их решения лишает возможности оценить уровень знаний, увидеть понимание предмета, не вдаваясь в теорию, сводится к заучиванию алгоритмов решения типовых задач. По мнению учителей, стандартизация, внедрение одинакового для всех подхода вместо индивидуального, ориентация на скорость оценки – всё это приводит к снижению качества. При этом, обладая техническими возможностями, можно сделать большое количество задач, ученик, нажав на кнопку, выберет из них 5-6, это будет объективная оценка знаний. Мнение преподавателей в оценки ЕГЭ звучит иначе: высокий балл не соответствует уровню подготовки студента, зачастую не совпадает с умением учиться. Попытка выяснить, будет ли оценка по математике в вузе выше у тех, кто получил высший балл по ЕГЭ по этому предмету ,результата не дало. По мнению исследователей, первокурсники с 70 и с 90 баллами ЕГЭ демонстрируют одинаковый уровень реальных математических компетенций, достойной только оценки "удовлетворительно". Академик Владимир Арнольд еще в 1998 году написал статью " Математическая безграмотность губительней костров инквизиции", в которой он отразил вред, который приносит нашей стране происходящее на наших глазах уничтожение фундаментальной науки в

России. Сейчас повсеместно внедряется цифровое образование, это лишает живого общения: через экран невозможно передать эмоции. В статье Алексея Савватеева, математика, члена корреспондента РАН отмечается, что цифровое образование до ученика не доходит, если ученик мотивирован, то он может дополнительно прослушать лекцию, а на базовом уровне необходимо живое общение, так как от цифрового ученика быстро перегорает. К сожалению, мы стали заложниками лёгких знаний, объявив Советское образование худшим и 30 лет разрушая его, а ведущие университеты и колледжи Англии, используя наш опыт, переделали наши учебники и учат по ним своих учеников. В результате этого коллапса мы перестали занимать первые места на олимпиадах, исключением служит только 2023 год, где ученица из Казани заняла первое место, а так Китай прочно удерживает эту позицию. Необходимо повысить статус учителя, вспомнить, что математика божественная наука, она везде в нашей жизни и наша задача вернуть ее на должный уровень, а не тратить триллионы рублей на цифровизацию, вернуть в школу хороших учителей, дав им достойную заработную плату, тогда и репетиторы вернуться в школы.



УДК 519.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Пхью Вэй Лин

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет  
«СТАНКИН»,

г. Москва, Россия

[phyowailinnmpt@gmail.com](mailto:phyowailinnmpt@gmail.com)

Рассмотрено несколько возможных подходов для моделирования процессов тепломассопереноса и фазовых переходов, происходящих при внешнем воздействии. Рассматривается тепломассоперенос и фазовый переход в двухслойной сфере, происходящий под действием тепловых источников. Такие источники могут быть обусловлены воздействием лазерного излучения. Массоперенос происходит по механизму «реакция – диффузия». Рассматривается также и окружающая среда, в которую происходит испарение молекул, а также структуры со сложной энергетической функцией.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, тепломассоперенос, фазовые переходы, уравнения переноса, реакция – диффузия, алгоритм Хошена - Копельмана, р-адический анализ, электромагнитное поле

В настоящее время, понимание и контроль фазовых переходов в мезо- и наноструктурированных системах имеют решающее значение для различных технологических применений. Например, в наноэлектронике фазовые переходы могут быть использованы для создания новых устройств, таких как мемристоры или память с фазовым переходом. В катализе, фазовые переходы могут существенно влиять на активность и селективность наночастиц катализатора. В технологиях накопления и преобразования энергии, таких как аккумуляторы, суперконденсаторы и топливные элементы. Данная тема посвящена актуальной проблеме процессов переноса и фазовых переходов в мезо- и наноструктурированных системах. Для изучения процессов переноса и фазовых переходов требуются методы математического моделирования. Обычно для моделирования фазовых переходов используются такие методы как уравнения переноса, метод фазового поля, метод ренорм-групп, стохастический анализ, р-адический анализ и другие.

В настоящей работе рассматривается тепломассоперенос и фазовый переход в двухслойной сфере, происходящий под действием тепловых источников. Такие источники могут быть обусловлены воздействием лазерного излучения. Массоперенос происходит по механизму «реакция – диффузия». Расчёт проводился для следующей системы: первый (наружный) слой заполнен жидким кристаллом (N-(4-метоксифенилиден)-4-бутиланилин), размер которого составляет 10 нм, а второй (внутренний) слой или внутренний слой, заполнен белком (аланин), размер которого составляет 1 нм. Рассматривается также и окружающая среда, в которую происходит испарение молекул, а также структуры со сложной энергетической функцией.

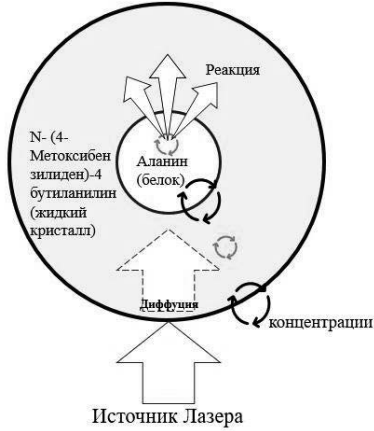


Рис.1. Модель двухкомпонентного массопереноса в неоднородной системе

Ранее в нашей работе [1] было получено решение для температур  $T_i$  в такой двухслойной системе, которое имеет вид:

$$T^{(1)} = T_0^{(1)} + \frac{2\chi\bar{q}R_1 t_\chi}{C_p^{(1)}\rho^{(1)}r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(y_n b x)\varphi_n \psi_n(\tau)}{\sin(y_n b)y_n^2}, T^{(2)} = T_0^{(2)} + \frac{2\chi\bar{q}R_1 t_\chi}{C_p^{(1)}\rho^{(1)}r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(y_n(d-x))\varphi_n \psi_n(\tau)}{\sin(y_n(d-1))y_n^2} \quad (1)$$

где  $R_1$  – радиус внутренней области,  $C_p^{(i)}$  – теплоемкость при постоянном давлении,  $\rho^{(i)}$  – плотность,  $q_2 = 0$ ,  $q_1 = \bar{q}$ ,  $\chi^{(i)}$  – коэффициент теплопроводности. Решение проводилось со следующими граничными условиями:

$$T^{(1)} = T^{(2)}, -\chi^{(1)} \frac{\partial T^{(1)}}{\partial r} = -\chi^{(2)} \frac{\partial T^{(2)}}{\partial r}$$

$$\chi = \frac{\chi^{(1)}}{\chi^{(2)}}, x = r/R_1, d = R_2/R_1, b = \left(\frac{\chi C_p^{(1)}\rho^{(1)}}{C_p^{(2)}\rho^{(2)}}\right)^{1/2}, \tau = t/t_\chi, t_\chi = \frac{C_p^{(2)}\rho^{(2)}R_1^2}{\chi^{(2)}}$$

Соответственно, функции, входящие в (1), определяются следующим образом:

$$1 - \chi + \chi b y \operatorname{ctg}(by) + y \operatorname{ctg}(y(d-1)) = 0, \varphi_n = (1 - b y_n \operatorname{ctg}(b y_n))(1 - \chi + \frac{\chi b^2 y_n^2}{\sin^2(b y_n)} + \frac{y_n^2(d-1)}{\sin^2((d-1)y_n)})$$

$\psi_n(\tau) = 1 - \exp(-y_n^2 \tau)$  в течение некоторого периода времени воздействия источника,  $y_n$  – корни уравнения. Плотность теплового источника электромагнитной природы в общем случае может быть записана так:

$$q = m_1 m_1 I_0 k |\vec{E}_1|^2 / (\sqrt{\varepsilon_{20}} |\vec{E}_0|^2) \quad (2)$$

где  $I_0$  – мощность лазерного излучения,  $m_1$  – комплексный показатель преломления

$$m_1 = m'_1 + jm''_1, m'_1 = (0.5(\varepsilon_{10} + (\varepsilon_{10}^2 + 16\pi^2\sigma^2 / \omega^2)^{0.5}))^{0.5}, m''_1 = \frac{2\pi\sigma}{\omega m'_1}, j = \sqrt{-1},$$

электрический вектор в оптически нелинейной частице зависит от параметра нелинейности, что влияет на изменение концентраций в первом и втором слое [1]. Ввиду малости внутренней сферы вместо распределённой плотности теплового источника можно рассматривать среднюю по объёму плотность.

Определив температуру, можно рассмотреть перенос вещества (концентрацию) в каждой из областей и между ними. Предполагается, что изменение концентрации компонентов во внутренней области происходит за счет реакции, а во внешней области – за счет диффузии.

Решение для концентрации  $c_1^{(1)}$  имеет вид:

$$c_1^{(1)} = \frac{c_1^0(c_{20} - c_1^0) \exp(-\nu_0(c_{20} - c_1^0)J(t))}{c_{20} - c_1^0 \exp(-\nu_0(c_{20} - c_1^0)J(t))}, J(t) = \int_{t_i}^t \exp(-\frac{U}{\bar{T}^{(1)}(s)}) ds \quad (3)$$

Для определения концентрации во второй области на внешней границе можно поставить однородные условия Неймана:  $\frac{\partial c_1^{(2)}}{\partial r} = 0$  или Дирихле:  $c_1^{(2)}(R_2) = 0$ . Поскольку коэффициент диффузии в общем случае зависит от температуры, то вводится величина  $\xi(t) = \int D(\bar{T}^{(2)})dt$  в качестве аналога времени. Обозначим через  $t = \gamma(\xi)$  функцию для определения времени, то есть обратную к функции  $\int D(\bar{T}^{(2)}(t))dt$  при заданной зависимости коэффициента диффузии от температуры. Она может быть найдена с использованием выражения для температуры во внешней области. Решение указанной задачи для концентрации первого компонента во внешней сфере имеет следующий вид:

$$c_1^{(2)} = \frac{c_1^{(1)}(\gamma(\xi))R_1(R_2 - r)^2}{r(R_2 - R_1)^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_n}{r} \exp(-\mu_n^2 \xi / R_2^2) (\sin(\frac{\mu_n r}{R_2}) - tg(\mu_n / d) \cos(\frac{\mu_n r}{R_2})) \quad (4)$$

Здесь через  $\mu_n$  обозначены корни уравнения:

$$\mu_n tg(\mu_n(1 - 1/d)) = 1 \quad (5)$$

Поскольку рассматривается случай  $d \gg 1$ , то данное решение можно записать в следующем виде:

$$c_1^{(2)} = \frac{c_1^{(1)}(\gamma(\xi))R_1(R_2 - r)^2}{r(R_2 - R_1)^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R_2}{r} \exp(-\mu_n^2 \xi / R_2^2) (K_{1n} \sin(\frac{\pi n r}{R_2}) + K_{2n} \cos(\frac{\pi n r}{R_2})) \quad (6)$$

$$K_{10} = M_1 \int_{\kappa}^1 \frac{x dx}{\sin(\mu_0(1 - \kappa)x)} - M_2 \int_{\kappa}^1 \frac{(1-x)^2 dx}{\sin(\mu_0(1 - \kappa)x)}, K_{1n} = 2M_1 \int_{\kappa}^1 \frac{x \cos(\pi n x) dx}{\sin(\mu_0(1 - \kappa)x)} - 2M_2 \int_{\kappa}^1 \frac{(1-x)^2 \cos(\pi n x) dx}{\sin(\mu_0(1 - \kappa)x)},$$

$$K_{2n} = 2M_1 \int_{\kappa}^1 \frac{x \sin(\pi n x) dx}{\cos(\mu_0(1 - \kappa)x)} - 2M_2 \int_{\kappa}^1 \frac{(1-x)^2 \sin(\pi n x) dx}{\cos(\mu_0(1 - \kappa)x)}$$

$$M_1 = c_{10} \cos(\mu_0 \kappa) / (1 - \kappa), M_2 = c_1^{(0)} \kappa \cos(\mu_0 \kappa) / (1 - \kappa)^3, \kappa = 1/d$$

Величина  $\mu_0$  определяется из уравнения  $\mu_0 = arctag(1/\mu_0)$ ,  $\mu_0 \approx 0,863$ .

Расчёты проводились для лазерного источника со следующими характеристиками: длина волны 520 нм с пикосекундным импульсом и мощностью лазера 6, 9, 12 МВт (милливатт) в течение 30, 60, 90 секунд.

Анализ полученного решения показал, что распространение концентрации может проходить как в режиме с постоянной температурой, так и в активационном режиме в зависимости от  $q$ . Также на режим влияет зависимость коэффициента диффузии от температуры.

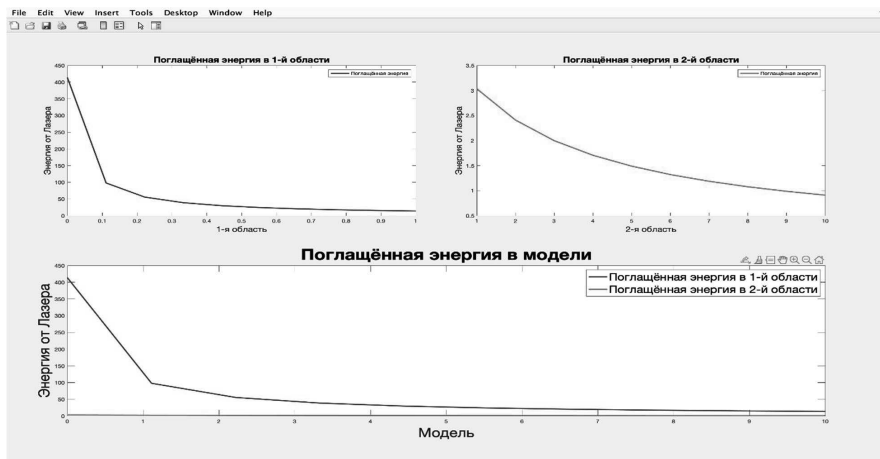


Рис.2. Графики поглощенной энергии в системе

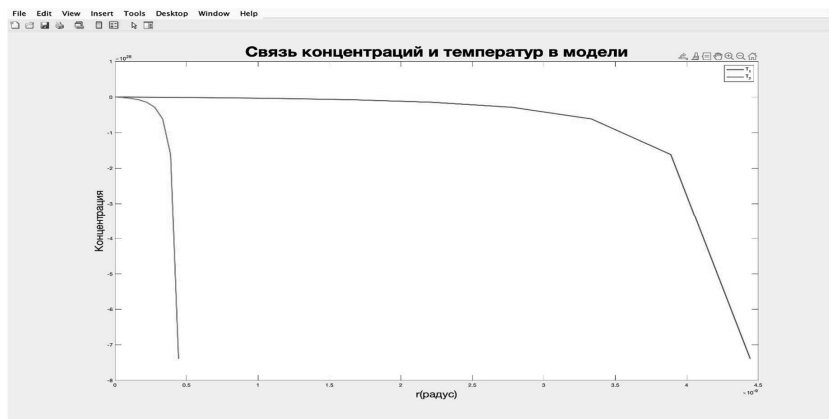


Рис.3. Графики связи концентраций и температур в модели

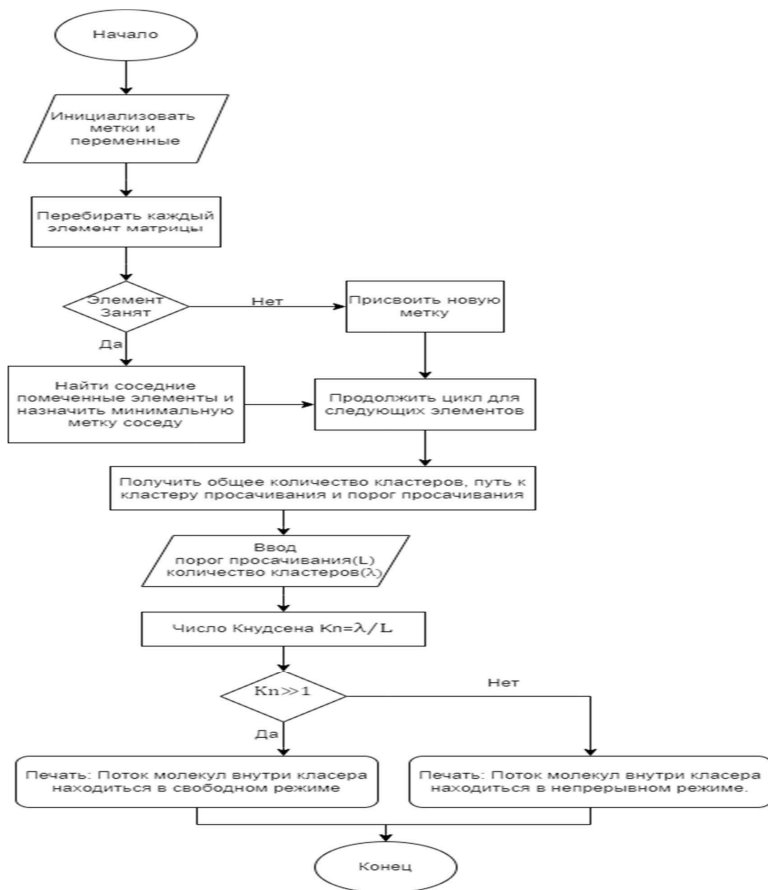


Рис. 4. Блок-схема модификации алгоритма

Как отмечено выше рассматриваемый здесь процесс реакции и теплопереноса. Для рассмотрения молекулярного фазового перехода в атмосферу на внешней границе рассматривалось дерево Келли. Центральный узел и часть узлов, получающиеся построением, располагаются на границе (поверхности) раздела фаз. В общем случае, длины рёбер, приходящиеся на жидкую и газовую (твёрдую) фазы, могут быть различными. Соответственно, мы рассматриваем молекулы, находящиеся в газовой и в жидкой (твёрдой) фазах, как узлы дерева Келли. Это позволяет рассмотреть молекулярный процесс в слое Кнудсена. Проведение соответствующих расчётов может быть проведено с использованием модифицированного алгоритма Хошена-Копельмана, позволяющего определить перколяционный кластер. Схема модификации алгоритма представлена на рис. 3. Получаемые таким образом результаты, в частности, могут быть использованы для постановки неоднородных граничных условий на внешней границе для рассмотренной выше задачи в зависимости от числа Кнудсена

(отношение средней длины свободного пробега к диаметру внешней сферы) может проходить в активационном режиме. В общем случае такой процесс может характеризоваться сложной функцией, описывающей свободную энергию. В этом случае можно применять для моделирования процесса р-адический анализ, а именно метод межбассейновой кинетики [2,3]. При этом для решения задачи, учитывающей изменение температуры, диффузию и реакцию необходимо использовать р- адические уравнения теплопроводности (неоднородное уравнение), диффузии, реакции-диффузии с оператором Владимирова дробного дифференцирования  $D_x^s$  ( $s=1/kT$ ,  $k$ - постоянная Больцмана) и соответствующих функций распределения.

В заключении отметим, что мы рассмотрели несколько возможных подходов для моделирования процессов тепломассопереноса и фазовых переходов, происходящих при внешнем воздействии.

#### Список литературы:

1. Л.А. Уварова, Пхью Вэй Лин. Моделирование процесса переноса “реакция – диффузия” в нелинейном электромагнитном поле// Вестник Самарского государственного технического университета, 2021, т.25, № 4, 663-675.
2. V.A.Avetisov, A.H.Bikulov, S.V.Kozyrev, V.A.Osipov p. Adic Models of Ultrametric Diffusion Constrained by Hierarchical Energy Landscapes // J.
3. Phys. A: Math. Gen. 2002 V.35. N.2. P.177–189.
4. И.В.Волович, С.В.Козырев. р–Адическая математическая физика: основные конструкции, применения к сложным и наноскопическим системам, 1 апреля 2008 г., <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1714900287&tld=ru&lang=ru&name=p-adicMF1.pdf&text>

# МЕТОДЫ ПРЕДОБРАБОТКИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ, ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МОДЕЛЯХ ML

А.Е. Лихинин, Е.М. Красикова

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1

В работе рассматривается применение методов обработки временных рядов в машинном обучении. Тема является актуальной, так как тренд среди компаний на внедрение методов машинного обучения в бизнес сохраняется. Для того, чтобы модели ML обучались, требуется предобработка данных.

Одним из главных свойств временного ряда является его стационарность. То есть постоянство с течением времени следующих характеристик: среднее значение, дисперсия, отсутствие тренда, отсутствие сезонности. Для оценки стационарности применяется критерий Дики-Фуллера.

В работе рассматриваются следующие методы предобработки временных рядов:  
– дифференцирование

$$y'(t) = y(t) - y(t-1),$$

где  $y'(t)$  – разность между текущим значением и предыдущим значением ряда

– логарифмирование

$$y'(t) = \ln(y(t)) \quad y'(t) = \lg(y(t))$$

– преобразование Бокса-Кокса

$$y'(t) = \begin{cases} \ln(y_t), & \alpha = 0 \\ \frac{y_t^\alpha - 1}{\alpha}, & \alpha \neq 0 \end{cases}$$

Благодаря представленным методам предобработки временных рядов, после преобразования данные становятся пригодными для обучения моделей ML, без их применения зачастую обучить модели невозможно.

## Список литературы:

1. Н.В. Артамонов, Е.А. Ивин, А.Н. Курбацкий, Д. Фантацини ВВЕДЕНИЕ В АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ [Текст] / Н.В. Артамонов, Е.А. Ивин, А.Н. Курбацкий, Д. Фантацини. — Вологда: ВолНЦ РАН, 2021 — 135 с. стр – 50
2. Прогнозирование временных рядов / [Электронный ресурс] // [https://nagornyy.me:\[сайт\]](https://nagornyy.me:[сайт]). — URL: <https://nagornyy.me/it/prognozirovanie-vremennykh-riadov/>
3. Box, G. E. P.; Cox, D. R. An analysis of transformations. (With discussion)
4. J.Roy. Statist. Soc. Ser. B 26 1964211–252. <http://www.ams.org/mathscinet-getitem?mr=192611>

# КИНЕТИКА МАССОПЕРЕНОСА ИЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЪЁМА ПРИ НАРУШЕНИИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТИ

**В.Л. Малышев**

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий

Могилёв, Беларусь

212027, пр.Шмидта, 3

Тел.: (8-0222) 64-90-11, e-mail: mail @ bgut.by

Продолжено исследование пористых материалов на модели, представляющей собой периодическую структуру, состоящую из системы связанных микро- или макрокапиллярами полостей. Период такой системы моделируется прямым цилиндрическим капилляром, переходящим в заполненный жидкостью сферический объём [1]. Полая сфера, из которой осуществляется испарение через тонкий капилляр, представляет собой конфузурную систему [2,3] термометрического типа.

Далее была применена бинарная термометрическая модель, предусматривающая испарение жидкости из сферического объёма через смежные соосные цилиндрические капилляры и принятая в качестве базовой. Характерной особенностью данной модели является встречное движение менисков в каналах через общую полость. Каждый из капилляров с полостью образуют элемент термометрической формы [1].

Следующим этапом актуализации модели явился, в отличие от базовой, учёт влияния силы тяжести [4]. Наиболее общая из предложенных моделей предполагает процесс интенсивного испарения жидкости из сферы через бинарную систему капилляров, расположенных во взаимоперпендикулярных направлениях, что позволило обобщить выводы теории на процесс испарения перегретой жидкости из сферического объёма через разноуровневые капилляры. Основываясь на теории, разработанной согласно приведённым моделям, были проведены численные оценки времени испарения жидкостей из полостей различных радиусов, а также осуществлён анализ длительности испарения на различных этапах процесса, позволивший установить вклад каждого из них в общую продолжительность процесса. Расчёты подтвердили, что интенсификация массопереноса путём нагревания для полостей  $R_0 \geq 0,004\text{ м}$  является малоэффективной. С целью проверки достоверности данного вывода были изучены различные сценарии процесса высокотемпературного парообразования во внутренних объёмах пористых материалов. Исследованные геометрические модели дали сопоставимые длительности осушения полостей (сутки и десятки суток).

В представленном материале рассматривается испарение жидкости из внутреннего объёма радиуса  $R_0$  через систему четырех разноуровневых взаимоперпендикулярных капилляров с начала ее кипения и мгновенного перехода в газовую фазу [5].

Скорость массопереноса определяется молярным расходом пара во внешнюю среду. Процесс завершается при значении переменной  $v = 0$ .

В результате получено выражение, позволяющее оценивать время массопереноса из сферической полости через систему цилиндрических каналов с



момента скачкообразного превращения остаточного количества жидкости в пар до полного осушения объема:

$$t_0 = \frac{32\eta R_0^3}{3P_0} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{r_i^4} \ln \left| \frac{4\pi R_0^3 P_0 + 3RTv_0}{4\pi R_0^3 P_0 - 3RTv_0} \right|,$$

где  $v_0$  – исходное количество жидкости на момент ее превращения в пар;  $P_0$  – атмосферное давление;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости парогазовой смеси;  $i$  – номер канала;  $n$  – количество каналов;  $l$  – координата межфазной поверхности жидкость–газ;  $r$  – радиус капилляра;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура;  $P_0$  – давление окружающей среды.

Проведены расчеты времени испарения в зависимости от радиуса полости и температуры процесса.

В качестве примера рассмотрен процесс испарения воды в воздушную среду. Вязкость паровоздушной газовой смеси определялась путем усреднения по парциальным давлениям компонентов.

**Таблица** - Зависимость времени испарения (с) от температуры для различных полостей

$T, K$ \ $R_0, m$	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001
413	94,107512	48,183046	20,32722	6,022881	0,75286
408	95,743471	49,020657	20,68059	6,127582	0,765948
403	97,102803	49,716635	20,97421	6,214579	0,776822
398	99,225444	50,803427	21,4327	6,350428	0,793804
393	100,81088	51,615173	21,77515	6,451897	0,806487
388	103,39047	52,935918	22,33234	6,61699	0,8271241

Расчет времени освобождения полости от паров жидкости после ее вскипания привел к величинам порядка секунд. Таким образом, одним из возможных путей осушения полостей без дополнительного нагрева является нарушение устойчивости метастабильной жидкости.

Решение данной задачи показало, что устойчивость испаряемой жидкости зависит от формы и размеров самой полости, поперечных и продольных характеристик капилляров, их количества и взаимного расположения по поверхности сферы.

### Список литературы

1. Малышев В.Л. // Весці НАНБ. Серыя фізіка-тэхнічных навук. № 3. 2014, с.37–42.
2. Малышев В.Л. // Вестник Белорусско-Российского университета. №3. 2008, с.127–134.
3. Малышев В.Л. // Весці НАНБ. Серыя фізіка-тэхнічных навук. № 1. 2010, с.71–76.
4. Малышев В.Л. // Веснік Магілеўскага дзяржаўнага ўніверсітэта ім. А.А. Куляшова. Серыя В, прыродазнаўчыя навукі: Матэматыка. Фізіка. Біялогія. №2(52). 2018, с.70–78.
5. Малышев В.Л., Пусовская Т.И. // Веснік Магілеўскага дзяржаўнага ўніверсітэта ім. А.А. Куляшова. Серыя В, прыродазнаўчыя навукі: Матэматыка. Фізіка. Біялогія. №2(56). 2020, с.47–53.

# СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ СРЕДНЕГО ЧИСЛА УЗЛОВ КЛАСТЕРА НА РАВНОМЕРНО ВЗВЕШЕННЫХ КВАДРАТНЫХ РЕШЕТКАХ

П. В. Москалев<sup>1,2</sup>, Л. С. Онищенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”,  
Москва, Россия, 127055, Вадковский пер., 1

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия,  
394006, ул. 20-летия Октября, 84

E-mail: moskaleff@mail.ru

Значительная часть статистических оценок характеристик кластеров на перколяционных решетках конечного размера связана с вероятностью образования этих кластеров, что делает такие оценки весьма чувствительными не только к размерам выборки, но и к размерам решетки. Аппроксимации таких эмпирических зависимостей часто основаны на различных сигмоидных функциях. Например, для аппроксимации относительной частоты образования стягивающих (перколяционных) кластеров из выборки  $\{w_i(p_i)\}$ , содержащей  $n$  точек на решетках конечного размера, можно использовать логистические модели [1, 2]:

$$w_i = 1/(1 + \exp(-(p_i - p_c)/s)) + e_i, \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $p_c$ ,  $s$  — параметры сдвига и масштаба модели (1), первый из которых обычно подлежит оценке, а второй определяется размером перколяционной решетки. Логистическая функция  $w(p)$  ограничена и строго монотонна, описывая асимптотический переход от нижнего предельного значения к верхнему при неограниченном увеличении аргумента:

$$w(p \rightarrow -\infty) \rightarrow 0+ \quad \text{и} \quad w(p \rightarrow +\infty) \rightarrow 1-. \quad (2)$$

Отметим, что при статистической оценке параметров функций вида (1) информационную значимость имеют только те точки, ординаты которых существенно отличаются от их предельных значений (2). При отсутствии априорных оценок порога перколяции это может увеличить вычислительную сложность задачи и привести к существенной зависимости погрешности статистических оценок от имеющихся вычислительных ресурсов.

Одним из возможных способов снижения вычислительной сложности такой задачи является оценка требуемых характеристик по выборкам величин на основе статистики не кластеров в целом, а узлов перколяционной решетки, входящих в кластеры.

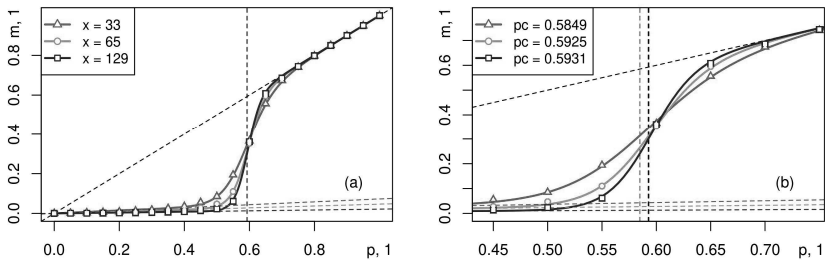
Оценочные данные будем формировать на основе количества узлов кластера с размером выборки  $N = 300$  реализаций на равномерно взвешенных квадратных решетках с линейными размерами  $x = 33, 65, 129$  узлов для заданной сетки вероятностей открытых узлов  $p = 0, 0,05, \dots, 1$ . Корреляционные поля этих выборок показаны на рисунке 1. Символы “треугольник”, “круг” и “квадрат” соответствуют выборкам, построенным на перколяционных решетках размерами  $x = 33, 65$  и  $129$  узлов.

Можно показать, что все представленные выборки  $\{m_i(p_i)\}$  могут быть аппроксимированы монотонными сигмовидными функциями, описывающими переход между нижней и верхней наклонными асимптотами, проходящими через начало координат. Это позволяет предложить обобщенную логистическую модель:

$$m_i = kp_i + (1 - k)p_i / (1 + \exp(-(p_i - p_c)/s)) + e_i, \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где  $k$  — параметр, определяющий угловой коэффициент нижней наклонной асимптоты;  $p_c, s$  — параметры сдвига и масштаба модели (3), определяющие положение точки перегиба и радиус окрестности, в пределах которой вторая производная аппроксимирующей функции (3) существенно отличается от нуля.

Наклонные пунктирные линии на рис. 1 соответствуют: а) нижним наклонным асимптотам вида  $m = kp$ , аппроксимирующим поведение модели (3) при докритических значениях вероятности открытых узлов  $p < p_c$ ; б) верхней наклонной асимптоте вида  $m = p$ , аппроксимирующая поведение модели (3) при закритических значениях вероятности открытых узлов  $p > p_c$  и совпадающая на интервале (0, 1) с интегральной функцией распределения с равномерно распределенной случайной величиной  $s \sim \text{unif}(0, 1)$ , взвешивающей узлы перколяционной решетки.



**Рис. 1.** Аппроксимация (3) для числа узлов кластера  $m$  на равномерно взвешенных квадратных решетках при  $x = 33, 65, 129$  узлов в зависимости от вероятностей открытых узлов  $p = 0, 0,05, \dots, 1$

Вертикальная пунктирная линия на рис. 1(а) соответствует значению порога перколяции узлов на квадратной решетке с единичной окрестностью фон Неймана  $p_c = 0,592746\dots$ , известному из литературы [2]. Вертикальные пунктирные линии на рис. 1(б) соответствуют статистическим оценкам параметра сдвига моделей (3), найденным для выборок кластеров узлов на решетках с разными линейными размерами: а)  $I_{0,95}(p_{c1}) = (0,5849 \pm 0,0026)$  при  $x_1 = 33$  узла; б)  $I_{0,95}(p_{c2}) = (0,5925 \pm 0,0017)$  при  $x_2 = 65$  узлов; в)  $I_{0,95}(p_{c3}) = (0,5931 \pm 0,0014)$  при  $x_3 = 129$  узлов.

Все результаты были получены с использованием функции «ssi20()» из пакета «SPSL», выпущенного автором для системы R под лицензией GNU GPL-3 [3]. Для оценки параметров регрессионной модели использовалась функция «gsl\_nls()» из пакета «gsl\_nls», выпущенного под лицензией GNU GPL-3 для системы R [4]. Сводка результатов, полученных при построении аппроксимации (3) числа узлов кластера по вероятности открытых узлов для квадратных решеток с размером  $x = 129$  узлов, приведена в этом листинге:

```
> print(summary(f3))
```

Formula:  $w_3 \sim k * pp + (1 - k) * pp / (1 + \exp(-(pp - pc)/s))$

Parameters:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

k 0.0213085 0.0047065 4.527 0.000261 \*\*\*

pc 0.5930757 0.0006710 883.896 < 2e-16 \*\*\*

s 0.0201649 0.0006513 30.963 < 2e-16 \*\*\*

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.004525 on 18 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 7

Achieved convergence tolerance: 5.236e-12

```
> print(confint(f3, parm="pc"))
```

```
2.5 % 97.5 %
```

```
pc 0.591666 0.5944853
```

При использовании только статистических показателей качество построенной аппроксимации можно охарактеризовать как хорошее. Отметим, что радиус доверительных интервалов 0,95 асимптотически уменьшается с увеличением размера решетки  $x$ . Например, абсолютная ошибка оценки параметра сдвига  $p_c$  модели (3) не превысит  $\varepsilon \leq 0,001$  при размере решетки не менее  $x \geq 250$  узлов, а уровень  $\varepsilon \leq 0,0005$  будет достигнут при размере решетки при минимум  $x \geq 1000$  сайтов. Такое поведение позволяет предположить, что качество модели (3) можно улучшить, выбрав функции, которые лучше аппроксимируют скрытые особенности данных, полученных в ходе вычислительных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-21-00376).

#### Список литературы:

1. Москалев П. В. Перколяционное моделирование пористых структур. – Москва: URSS, 2018.
2. Newman M. E. J., Ziff R. M. // Phys. Rev. Lett., V. 85, 2000, P. 4104, DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.4104.
3. Moskalev P. V., SPSL: Site Percolation on Square Lattices. – CRAN, 2019, URL: <https://cran.r-project.org/package=SPSL>.
4. Chau J. gslnl: GSL Nonlinear Least-Squares Fitting. – CRAN, 2023. – URL: <https://cran.r-project.org/package=gslnl>.

## АНАЛИЗ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОБРАЗЦА ПОРИСТОГО ТИТАНА

П. В. Москалев<sup>1,2</sup>, В. Ф. Селиванов<sup>2</sup>, Л. С. Онищенко<sup>2</sup>, А. В. Нетреба<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
Москва, Россия, 127055, Вадковский пер., 1

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет,  
Воронеж, Россия, 394006, ул. 20-летия Октября, 84

E-mail: moskaleff@mail.ru

Эффективность применения пористых материалов сильно зависит от способности конструкторов прогнозировать их свойства, которые, в свою очередь, зависят от доступности данных о внутренней структуре пористых материалов [1]. В одном из простейших случаев внутренний объем пористых материалов складывается из трех частей: открытых, тупиковых и закрытых пор, различающихся связностью соответствующего объема с внешними поверхностями исследуемого образца.

Для наших исследований мы использовали образцы пористого титана, полученные прессованием титанового порошка марки ПТЭК с последующим спеканием при различной степени уплотнения заготовок. Спекание проводилось в металлическом герметичном контейнере при абсолютной температуре порядка 1288 К и остаточном давлении порядка 0,1 Па [2]. Основная часть работ по характеристике образцов была выполнена весной – осенью 2023 года в Воронежском государственном техническом университете. Полная пористость образцов оценивалась гравиметрическим методом по разнице масс сплошного и пористого материалов, а эффективная пористость — по разнице масс сухого и насыщенного дистиллированной водой образцов. При этом полная пористость образцов  $P_t$  варьировалась в интервале от 0,21 до 0,52 а эффективная пористость  $P_e$  варьировалась в интервале от 0,02 до 0,42 [3].

Оценка распределения пор по размерам основана на сравнительном анализе эмпирических расходных характеристик сухих  $\{Q_{0i}(p_i)\}$  (символы «круг» на рис. 1(а)) и насыщенных дистиллированной водой  $\{Q_{1i}(p_i)\}$  (символы «треугольник» на рис. 1(а)) образцов [1]. На рис. 1(а) показаны примеры корреляционных полей и нелинейных аппроксимаций для расходных характеристик  $\{Q_{0i}(p_i)\}$  и  $\{Q_{1i}(p_i)\}$  образца с полной пористостью  $P_t = 0,441$  и эффективной пористостью  $P_e = 0,394$ . Для аппроксимации расходной характеристики сухого образца мы использовали квадратичный полином с нулевым свободным членом:

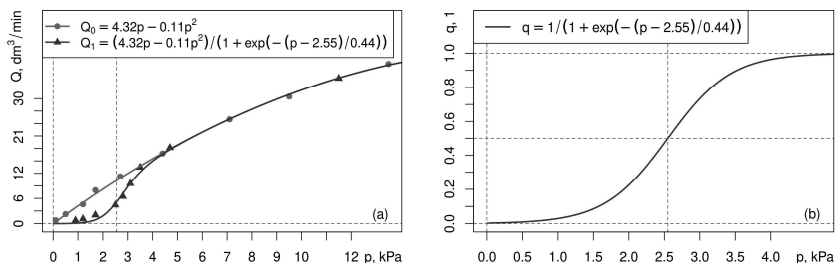
$$Q_{0i} = b_1 p_i - b_2 p_i^2 + e_i, \text{ для } i = 1, 2, \dots, n_0, \quad (1)$$

где  $Q_{0i}$  — объемный расход воздуха через сухой образец,  $\text{дм}^3/\text{мин}$ ;  $p_i$  — дифференциальное давление для образца, кПа;  $n_0$  — объем выборки, полученной для расходной характеристики  $\{Q_{0i}(p_i)\}$ ;  $b_{1,2}$  — компоненты вектора параметров модели (1), оцениваемые методом наименьших квадратов по выборке  $\{Q_{0i}(p_i)\}$ . Для аппроксимации расходной характеристики насыщенного дистиллированной водой образца  $\{Q_{1i}(p_i)\}$  мы использовали произведение полинома (2) и логистической функции:

$$Q_{1i} = (b_1 p_i - b_2 p_i^2) / (1 + \exp(-(p_i - b_3)/b_4)) + e_i, \text{ для } i = 1, 2, \dots, n_1, \quad (2)$$

где  $Q_{1i}$  — объемный расход воздуха через насыщенный дистиллированной водой образец,  $\text{дм}^3/\text{мин}$ ;  $n_1$  — объем выборки, полученной для расходной характеристики

$\{Q_{1i}(p_i)\}$ ;  $b_{3,4}$  — компоненты вектора параметров модели (2), оцениваемые нелинейным методом наименьших квадратов по выборке  $\{Q_{1i}(p_i)\}$ .



**Рис. 1.** Расходные характеристики для исследуемого образца пористого титана: а) в абсолютных формах (1) и (2); б) в относительной форме (3)

Если рассмотреть отношение функций (2) и (1), то можно получить интегральную расходную характеристику образца  $q(p) = Q_1(p)/Q_0(p)$ , описывающую переход между функциями (2) и (1) при увеличении дифференциального давления на образце  $p$ :

$$q = 1/(1 + \exp(-(p - b_3)/b_4)). \quad (3)$$

Пример интегральной расходной характеристики исследуемого образца пористого титана (3) показан на рис. 1(б). Нетрудно видеть, что сдвиговые параметры  $b_3 \approx 2,549$  для моделей (2) и (3) совпадают, причем абсцисса  $p = b_3$  соответствует максимуму первой производной и точке перегиба относительной расходной характеристики (3).

Для перехода от дифференциальных давлений на образце  $p$  к эквивалентным гидравлическим радиусам пор  $r$  можно использовать уравнение Юнга-Лапласа [4]:

$$r = 2\sigma \cos(\theta)/p, \quad (4)$$

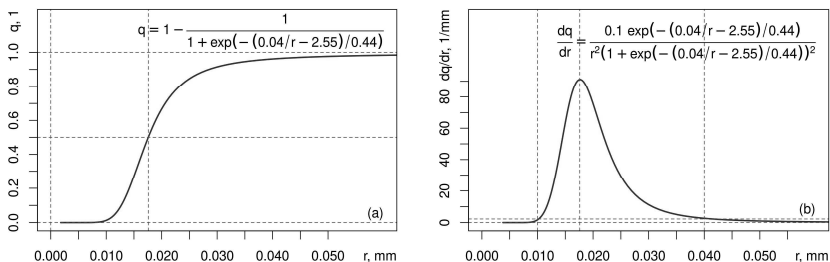
где  $\sigma = 0,0725$  Н/м — коэффициент поверхностного натяжения на межфазной границе «вода – воздух»;  $\theta = 72^\circ$  — контактный угол на межфазной границе «вода – диоксид титана». С учетом (4) интегральная  $q(r)$  и дифференциальная  $dq(r)/dr$  размерные характеристики (соответствующие распределениям пор по размерам в исследуемом образце) примут вид:

$$q = 1 - 1/(1 + \exp(-(c_1/r - b_3)/b_4)); \quad (5)$$

$$dq/dr = c_1 \exp(-(c_1/r - b_3)/b_4)/(b_4 r^2 [1 + \exp(-(c_1/r - b_3)/b_4)]^2), \quad (6)$$

где  $c_1 = 2\sigma \cos(\theta) \approx 0,0448$  Н/м — размерный коэффициент из уравнения Юнга-Лапласа.

На рис. 2 показаны примеры построения интегральной (5) и дифференциальной (6) размерных характеристик для исследуемого образца пористого титана. Для статистической оценки параметров регрессионных моделей использовалась функция “*gsl\_nls()*” из пакета “*gslnls*”, выпущенного под лицензией GNU GPL-3 для системы R [5]. Сводка результатов, полученных при построении аппроксимаций (1) и (2) для расходных характеристик исследуемого образца пористого титана, приведена в листинге 1.



**Рис. 2.** Распределения пор по размерам для исследуемого образца пористого титана: а) в интегральной форме (5); б) в дифференциальной форме (6)

**Листинг 1.** Оценка параметров моделей (1) и (2) для исследуемого образца

```
> print(summary(f11 <- lm(Q1 ~ 0 + p1 + I(p1^2))))
Call:
lm(formula = Q1 ~ 0 + p1 + I(p1^2))
Residuals:
    Min     1Q   Median     3Q     Max
-0.4849 -0.1028  0.1175  0.3440  0.9270
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
p1          4.320733   0.087290  49.50 3.60e-10 ***
I(p1^2)    -0.111491   0.007801 -14.29 1.95e-06 ***
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.4833 on 7 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9995, Adjusted R-squared:  0.9994
F-statistic: 7521 on 2 and 7 DF, p-value: 2.17e-12

> b1 <- coef(f11)[1]
> b2 <- coef(f11)[2]
> print(summary(f12 <- gsl_nls(Q2 ~ (b1*p2 + b2*p2^2)/(1+exp(-(p2-b3)/b4)),
+                               start=list(b3=1, b4=1))))
Formula: Q2 ~ (b1 * p2 + b2 * p2^2)/(1 + exp(-(p2 - b3)/b4))
```

Parameters:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

b3 2.54861 0.09757 26.121 3.08e-08 \*\*\*

b4 0.44378 0.09700 4.575 0.00256 \*\*

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.82 on 7 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 18

Achieved convergence tolerance: 2.396e-12

На основе статистических показателей качество построенных аппроксимаций (1) и (2) можно охарактеризовать как хорошее. Основанная на этих аппроксимациях и показанная на рис. 2(а) интегральная характеристика (5) представляет собой асимметричную сигмоидную функцию с «тяжелым хвостом» и точкой перегиба при критическом значении гидравлического радиуса пор  $r_c \approx 0,0176$  мм. Соответственно, показанная на рис. 2(б) дифференциальная характеристика (6) представляет собой колоколообразную кривую с положительной асимметрией и глобальным максимумом при том же критическом значении гидравлического радиуса пор. Указанная асимметрия особенно хорошо заметна при построении 0,95-доверительного интервала для гидравлических радиусов пор, показанного горизонтальной и соответствующими ей вертикальными штриховыми линиями на рис. 2(б):

$$I_{0,95}(r) = (0,01; 0,04) = (0,0176 - 0,076; 0,0176 + 0,0224).$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-21-00376).

### Список литературы

1. Плаченев Т. Г., Колосенцев С. Д. Порометрия. – Л.: Химия, 1988.
2. Москалев П. В., Селиванов В. Ф., Бокарев Д. И. и др. // Preprints.ru, 2023. – DOI: 10.24108/preprints-3112910.
3. Анциферов В. Н., Устинов В. С., Олесов Ю. Г. Спеченные сплавы на основе титана. – М.: Металлургия, 1984.
4. Washburn E. // PNAS USA. – 1921. – Vol. 7. – P. 115. – DOI: 10.1073/pnas.7.4.115.
5. Chau J. gslnls: GSL Nonlinear Least-Squares Fitting. – CRAN, 2023. – URL: <https://cran.r-project.org/package=gslnls>.



# НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕИДЕАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОПУЛ

Мохаммад Р.

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия  
127055, Вадковский пер., 3а  
E-mail: rasha.ossama.mohammad@gmail.com

Рассмотрен процесс испарения молекул в двухкомпонентных жидких растворах, если жидкий раствор является идеальным, то давление пара обоих компонентов подчиняется закону Рауля. Этот закон утверждает, что равновесное давление пара над смесью равно равновесному давлению чистого компонента, умноженному на мольную долю. Однако реальные растворы могут отличаться от этого идеального поведения. Как и в случае с газами, где использование фугитивности позволяет позволить нам использовать идеальные модели, активность используется для учета отклонения растворенных веществ от ограничивающего идеального поведения. Активность растворенного вещества связана с его концентрацией  $a_B = \gamma \frac{m_B}{m^0}$  где  $\gamma$  (коэффициент активности),  $m_B$  (моляльность растворенного вещества),  $m^0$  (единица моляльности). Коэффициент активности в этом определении безразмерен, и поэтому активность также безразмерна. Более того, коэффициент активности приближается к единице, когда моляльность растворенного вещества приближается к нулю, что обеспечивает идеальное поведение разбавленных растворов.

Мы будем использовать механизм копулы для описания взаимной корреляции между параметрами активности. Самой популярной копулой, используемой при моделировании, является гауссова копула. Пусть  $\Phi$  - это стандартная функция нормального распределения. Если  $X$  и  $Y$  - это стандартные нормальные случайные величины, совместное распределение которых представляет собой двумерное нормальное распределение с корреляцией  $\rho$ , то совместное распределение  $\Phi(X)$  и  $\Phi(Y)$  называется гауссовой копулой. Математически гауссова копула  $C$  определяется формулой:

$$\begin{aligned} C(x, y) &= P(\Phi(X) \leq x, \Phi(Y) \leq y) = P(X \leq \Phi^{-1}(x), Y \leq \Phi^{-1}(y)) \\ &= \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(x)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(y)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}(x^2+y^2-2\rho xy)} dx dy \end{aligned}$$

Мы используем этот тип копулы, из-за его гибкости, которая позволяет моделировать сложные структуры зависимостей между переменными. Кроме того, гауссовы копулы часто имеют выражения в замкнутой форме для своей плотности и кумулятивных функций распределения, что делает вычисления более эффективными в вычислительном отношении по сравнению с другими семействами копул. Также можно рассматривать копулы с другими совместными распределениями. В частности, учитывая закон Аррениуса, можно рассматривать экспоненциальные зависимости. Таким образом, проводя моделирование состояния раствора и фазовых переходов в многокомпонентных растворах, можно использовать аппарат копул.

# ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

А.С. Мягков

МГТУ «СТАНКИН, Москва, Россия»

127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: (+7 926)883-31-29, e-mail: almyagkov99@yandex.ru

На сегодняшний день математическое моделирование нелинейных процессов и систем представляет собой многогранную и комплексную задачу. Особое внимание, на данном этапе развития методов и средств решения нелинейных задач, уделяется отысканию аналитического точного решения, которое может быть выражено в элементарных функциях, их комбинаций, или разложением искомой функции в ряд.

За последние 5-7 лет широкое распространение в зарубежной практике получил подход к решению подобных задач, с использованием универсального аппроксиматора – нейронных сетей с физическим информированием (Physical Informed Neural Networks – PINN) [1-3]. Применение подобных НС позволяет решать прямую и обратную задачи поиска аналитико-численного решения нелинейных ДУЧП.

В первом случае, задается формальное описание модели, т.е. уравнение, с входящими в него физическими константами, производится обучение на некотором начальном наборе данных, полученных для простейших случаев, а затем отыскивается численное решение [4-5]. Поскольку подобные сети являются НС с глубоким обучением, то они позволяют получать в целом, точные численные аппроксимации, вытесняя традиционные разностные схемы. Обратная задача [4-5] состоит в нахождении параметров искомой математической модели (уравнения), например, коэффициента вязкости, массы, коэффициента теплопроводности и т.д.

Однако, на сегодняшний день наблюдается некоторая стагнация, поскольку часто поиск решения ограничивается лишь извлечением значений параметров модели для конкретного случая. Во-первых, основной проблемой является обоснованный выбор числа обучающих выборок, т.е. размерность начальных данных [6]. Во-вторых, найденное решение, как правило не анализируется с точки зрения устойчивости и единственности, принятой в классической постановке задач математической физики.

Стоит отметить, что поскольку НС является в некотором смысле обобщенным МНК аппроксиматором, то применение PINN-сетей в теории, в перспективе, позволит получать обобщенные решения нелинейных уравнений, точное аналитическое решение, оптимальное в классе полученных уже на ранних этапах численных аппроксимаций. Подобные идеи освещались в работах [7], для формализации аналитической модели разрешаемой задачи применялись генетические алгоритмы оптимизации. Однако, подтверждение целесообразности применения данного подхода производилось исключительно для линейных моделей, описываемых ОДУ. Применение подобных алгоритмов к решению нелинейных ДУЧП на текущий момент не проводилось.

В связи с вышеизложенным, можно сформулировать первое направление дальнейшего развития данной методологии решения нелинейных задач: применение

генетических алгоритмов для поиска точной аналитической функциональной зависимости, в случае ДУЧП (например, НУШ, КдВ, уравнения Навье-Стокса и т.д.)

Поиск точного решения обуславливается задаваемыми граничными и начальными условиями, а также значением параметров модели  $\theta_{NN}$ , формируемых в виде отклика НС. Поэтому, необходимо описать общую постановку задачи.

Рассмотрим некоторую область  $\Omega$ , и границы области  $\partial\Omega$ . Введем обозначение следующих дифференциальных операторов

$$\mathcal{D}(u(x)) = 0, \quad x \in \Omega \quad (1)$$

$$\mathcal{B}(u(x)) = 0, \quad x \in \partial\Omega \quad (2)$$

где  $\mathcal{D}$  есть нелинейный дифференциальный оператор (т.е.  $\partial/\partial x$ ,  $u \circ \partial/\partial x$ ,  $u \circ \partial^2/\partial x^2$ ), а оператор  $\mathcal{B}$  обозначает заданные граничные условия (условия Дирихле, условия Неймана, граничные условия Робина и т.д.). Обозначим решение, получаемое посредством PINN-сетей, обозначим  $\hat{u}(x; \theta_{NN})$ . Для описания физической части откликов требуется провести анализ остатков регрессионной модели. Остатки обозначим функцией

$$f(x; \theta_{NN}) := \mathcal{N}(\hat{u}(x; \theta_{NN})). \quad (3)$$

Поиск наилучшего (оптимального) решения основан на минимизации функции стоимости (или функции потерь), которая представляет собой функционал:

$$J(\theta_{NN}) = MSE_u + MSE_f. \quad (4)$$

Среднеквадратичные ошибки вычисляются в соответствии с формулами:

$$MSE_u = \frac{1}{N_u} \sum_{i=1}^{N_u} |\hat{u}^i - u(x_u^i, t_u^i)|^2, \quad (5)$$

$$MSE_f = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} |f(x_f^i, t_f^i)|^2. \quad (6)$$

Здесь  $u(x_u^i, t_u^i)$  представляют обучающие данные для начальных и граничных условий,  $u(x_f^i, t_f^i)$  являются обучающими данными для пространственно-временной области, а  $f(x_f^i, t_f^i)$  представляют собой остатки регрессионной модели – часть функции стоимости. Выражение (5) показывает, что спроектированная НС удовлетворяет заданным начальным условиям, выражение (6) показывает, что остатки модели отражают физические ограничения, которые положены в основу нелинейной модели, т.е по сути зависят от физической составляющей моделируемого процесса, например, различные физические константы и их значения. Минимизация функции стоимости представляет собой оптимизацию параметров функционала (4):

$$w^* = \arg \min_{w \in \theta} J(w), b^* = \arg \min_{b \in \theta} J(b) \quad (7)$$

На рис.1. представлена схема алгоритма решения задачи посредством PINN-сети.

Здесь основная задача состоит в определении значений физических параметров, и самой модели, положенной в основу исследуемого процесса. Итоговая среднеквадратичная ошибка есть сумма среднеквадратичных ошибок остатков и полученных значений сеточной функции  $\hat{u}^i$ , с учетом заданных начальных и граничных условий.

Одной из ключевых проблем является подбор обучающей выборки. В большинстве работ [2-6] для обучения НС применяются не маркированные данные, которые при этом получены для стандартных случаев (уравнений). Подобное обстоятельство объясняется следующим образом. Ключевая задача физически информированных нейронных сетей – разумная регуляризация физической информации. Использование физической информации позволяет нейронным сетям извлекать решения уравнений в частных производных на основе меньшего количества наблюдений. Чаще всего, регуляризация физической информации реализована посредством автоматического дифференцирования TensorFlow, а также иных библиотек, в которых реализованы основные методы многомерной оптимизации. К сожалению, данный инструментарий неприменим во многих практических приложениях.

Возникает необходимость в разработке общих методов регуляризации физического информации.

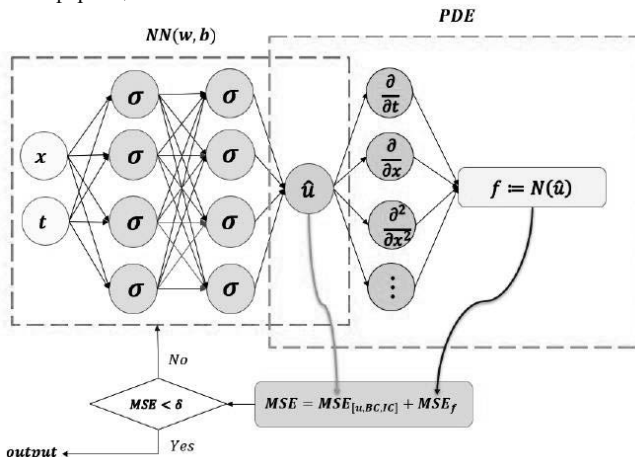


Рис.1. Схема спроектированной PINN- сети для решения ДУЧП.

Второй проблемой является выбор метрик функции потерь. В работах [9-11] показано, что выбор различных норм ошибки, существенно влияет на скорость и точность оптимизации и численную аппроксимацию.

Не менее значима и проблема валидации найденного решения, тем более, если не имеется точного решения поставленной задачи.

Практически во всех представленных работах, полученное решение не анализируется с точки зрения устойчивости и единственности существования.

В рамках выбранного подхода также ключевым направлением является поиск оптимального в классе всех решений точного решения, для различных сечений временного и координатного слоев сеточной функции. При этом именно данный вопрос отражает физический смысл численной аппроксимации.

Поиск точного решения для всего класса решений  $\mathcal{C}$  в теории, основан на следующей процедуре:

1. Задаются операторы начальных и граничных условий ДУЧП

2. Задается набор функций активаций и производится обучение PINN-сети при заданных значениях параметров  $\theta_{NN}$
3. Отыскивается численная аппроксимация для каждого момента времени  $t_i$
4. Затем осуществляется незначительное изменение значений параметров  $\theta_{NN}$
5. Производится повторный поиск численных решений для тех же моментов времени  $t_i$
6. Выбираются значения параметров  $\theta_{NN}$ , приводящих к появлению режимов с обострением (*LS*, *HS*-режимы)
7. Производится повторный поиск численных аппроксимаций, при которых  $J(\theta_{NN}) \rightarrow \min$
8. Таким образом, получаем множество решений  $U_{PINN} = \hat{u}(x; \theta_{NN})$ .

Основная задача состоит в нахождении оптимального решения в классе всех решений. Аналитическое представление данного решения можно получить, в результате применения генетического алгоритма. Например, псевдокод такого алгоритма представлен ниже:

```
function translate_genetic_programming_tree(node):
  if node is a terminal node:
    return symbol or value of the terminal node
  else if node is a function node:
    translated_args = [translate_genetic_programming_tree(child) for child in
node.children]
    return function_symbol + "(" + ", ".join(translated_args) + ")"
  else if node is an operator node:
    left = translate_genetic_programming_tree(node.left)
    right = translate_genetic_programming_tree(node.right)
    return "(" + left + " " + operator_symbol + " " + right + ")"
  else:
    return translated_representation_of_node
```

Т.е. символьное аналитическое представление представляет собой граф, вершины которого суть различные элементарные функции, а связь между узлами представляет собой некоторый оператор, например сумму. Стоит отметить, что данный алгоритм должен пройти апробацию для большого числа полученных численных аппроксимаций. Важно отметить, что генетические алгоритмы не являются оптимальными, и неэффективными, с точки зрения объемов выделяемой памяти, а также времени итераций оптимизации.

Оптимальное решение  $U_{PINN}^*$  при этом должно удовлетворять нескольким важным условиям. Рассмотрим их.

*Предложение 1.* Положим, что  $U_h$  последовательность PINN-решений  $U_{PINN}^h$ . Решение  $U_{PINN}^*$  является устойчивым, если  $\lim_{h \rightarrow 0} U_h = U_{PINN}^*$ , где  $h$  – шаг временно-пространственной сетки. В данном случае, мы имеем в виду шаг пространственного слоя.

*Предложение 2.* Положим, что в классе решений  $\mathcal{C}$  найдется некоторая критическая точка. Если мера множества  $m(\mathcal{C}) = 0$ , то отклонение данного решения  $U_{PINN}^h$  от оптимального  $U_{PINN}^*$  пренебрежимо мало. Т.е решение должно удовлетворять теореме Сарда.

*Предложение 3.* Решение  $U_{PINN}^*$  должно представлять собой функцию, дифференцируемую по Лебегу. В контексте решения ДУЧП с помощью PINN-сетей, данное предложение подразумевает, что почти в каждой точке пространства решений решение  $U_{PINN}^*$  обеспечивает репрезентативную и значимую характеристику решения основного ДУЧП, которое аналитически может быть и неизвестно.

Таким образом, в данном обзоре представлено общее описание современного подхода поиска решений нелинейных задач математической физики, а также описаны дальнейшие пути развития PINN-сетей и методов уточнения аналитико-численных решений. Сформулированы некоторые предложения, доказательство и обоснование которых представляет собой интерес, с точки зрения физики и дальнейшего совершенствования способ отыскания обобщенных решений нелинейных уравнений, при различных значениях  $\theta_{NN}$ .

### Список литературы:

1. Guo, Yanan & Cao, Xiaoqun & Bainian, Liu & Gao, Mei. (2020). Solving Partial Differential Equations Using Deep Learning and Physical Constraints. Applied Sciences. 10. 5917. 10.3390/app10175917.
2. Jagtap, Ameya & Kharazmi, Ehsan & Karniadakis, George. (2020). Conservative physics-informed neural networks on discrete domains for conservation laws: Applications to forward and inverse problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 365. 113028. 10.1016/j.cma.2020.113028.
3. Raissi, Maziar & Perdikaris, Paris & Karniadakis, George. (2017). Physics Informed Deep Learning (Part II): Data-driven Discovery of Nonlinear Partial Differential Equations.
4. Raissi, Maziar & Perdikaris, Paris & Karniadakis, George. (2017). Physics Informed Deep Learning (Part I): Data-driven Discovery of Nonlinear Partial Differential Equations.
5. T. Ye, X. Wang, J. Davidson, and A. Gupta, "Interpretable intuitive physics model," in Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018, pp. 87–102.
6. Han, Jiequn & Jentzen, Arnulf & Ee, Weinan. (2017). Solving high-dimensional partial differential equations using deep learning. Proceedings of the National Academy of Sciences. 115. 10.1073/pnas.1718942115.
7. Cranmer, M. (2023). Interpretable Machine Learning for Science with PySR and SymbolicRegression.jl.

# ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИЙ АЛГОРИТМОВ КОНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА

К.М. Назаренко, Н.А. Коробов, Е.С. Назаренко,

П.Н. Марков, Д.А. Токарев, А.Б. Надыкто

МГТУ «СТАНКИН» Россия, 127055, г. Москва, ул. Вадковский пер. 1;

Тел.: (+7 499)972-95-00, E-mail: cmr.nazyto@gmail.com

Применяемые для математического моделирования структуры и свойств молекулярных систем в газофазном и конденсированном состоянии методы квантовой химии, в частности, основанные на теории функционала плотности, реализованы в разнообразных проблемно-ориентированных пакетах прикладных программ. Широкое распространение в исследовательской практике получил пакет Gaussian [1].

В данном исследовании рассматривается возможность использования пакета Orca [2] для повышения производительности конформационного поиска.

Нами проведена серия вычислительных экспериментов для сравнения производительности реализаций соответствующих алгоритмов в пакетах Gaussian и Orca, а также точности описания структуры и свойств молекулярных кластеров, полученных с их помощью.

В первом эксперименте проводилась оптимизация геометрической конфигурации тригидрата тримера серной кислоты  $(\text{H}_2\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_3$ . Ранее эта молекулярная структура уже использовалась нами в комплексном исследовании производительности пакета Gaussian [3]. Выполнение вычислительных заданий с использованием различного числа процессорных ядер позволило определить эффективность параллелизации алгоритмов в рассматриваемых пакетах. Время, затрачиваемое на один шаг оптимизации которыми, приведено на рисунке 1.

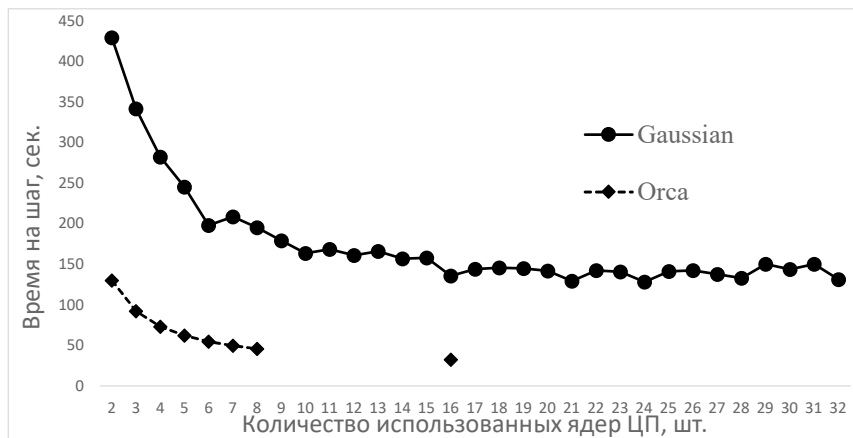


Рис. 1. Продолжительность шага оптимизации (сек) пакетами Gaussian и Orca, выполняемой с использованием различного числа процессорных ядер.

Отсутствие некоторых данных для пакета Orca обусловлено технической невозможностью выполнения расчётов с данным числом процессоров. Эксперименты проводились на сервере, оснащённом ЦП Intel(R) Xeon(R) Gold 6230R с тактовой частотой 2.10ГГц, использовалась виртуальная ОС AlmaLinux 9, под которую было выделено 64Гбайт ОЗУ. Исследовались пакеты: Orca 5.0.4 и Gaussian 09E.01. Анализ рисунка позволяет сделать вывод, что шаг оптимизации конфигурации молекулярного кластера при использовании пакета Orca выполняется в 3.3 - 4.25 раза быстрее, при этом максимум соотношения производительностей пакетов наблюдается при использовании восьми ядер.

Обратим внимание на то, что при использовании пакета Gaussian из 32 вычислительных заданий (по числу возможностей использования процессорных ядер) для одних и тех же исходных данных лишь в четверти случаев оптимизация была успешно завершена с первого раза. Более подробно этот факт нами освещался в работе [4]. При этом полученные значения свободной энергии Гиббса находятся в диапазоне шириной 1.51 ккал/моль, что превышает погрешность химической точности в 1 ккал/моль. При повторном эксперименте с первого раза успешное завершение оптимизации наблюдалось лишь в 7 случаях (не совпадающих с результатами предыдущей попытки), результаты расчета свободной энергии Гиббса для которых лежат в интервале шириной 0.027 ккал/моль.

При использовании пакета Orca во всех вычислительных заданиях оптимизация завершается успешно с первого раза, а полученные значения свободной энергии Гиббса практически совпадают (находятся в интервале шириной  $10^{-4}$  ккал/моль). Сходные результаты были получены и при моделировании димера серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )<sub>2</sub>.

Таким образом, методология применения пакета Gaussian должна учитывать кратное использования начальных геометрий, поскольку результат ее дальнейшей оптимизации не определен.

В следующем эксперименте проводилось моделирование гидратации серной кислоты. В ранней работе с использованием пакета Gaussian09 было проведено численное исследование газофазных гидратов серной кислоты широким набором квантово-химических методов, основанных на теории функционала плотности, включающее сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [5]. В качестве исходных данных использовались геометрические конфигурации изомеров, опубликованные в работе Темелсо [6]. Это позволило выявить несколько методов, адекватно описывающих эту цепочку реакций, наиболее приемлемым из которых является комбинация обменно-корреляционного функционала Пердю-Вонга с максимальным базисным набором Попла [7] (PW91PW91/6-311++G(3df,3pd)).

Непосредственное сравнение значений свободной энергии Гиббса, получаемых с использованием различных пакетов, не является информативным (поскольку расчеты интегралов производятся ими с использованием разных сеток), поэтому для сопоставления точности описания моделируемого процесса нами рассматриваются пошаговые изменения значений свободной энергии Гиббса для цепочки реакций, приведенные на рисунке 2. В расчетах использованы последовательные оптимизации исходных геометрических конфигураций с применением различных пакетов и методов высокого и низкого уровня теории.

Анализ рисунка 2 позволяет заключить, что при моделировании гидратации серной кислоты между результатами, получаемыми с использованием пакетов Gaussian



и Orca, отсутствуют отклонения в значениях свободной энергии Гиббса реакций, превышающие химическую точность.

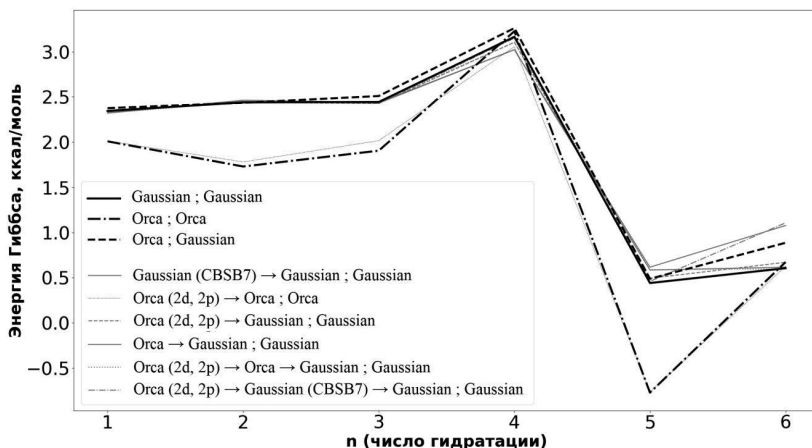


Рис. 2. Изменение  $\Delta G$  для реакции  $(\text{H}_2\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_{n-1} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{H}_2\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_n$  в зависимости от числа гидратации  $n$ , рассчитанное пакетом указанным после «;», последовательность оптимизаций указана до «;».

Для определения наиболее производительной схемы конформационного поиска проведен вычислительный эксперимент с использованием различных комбинаций используемых пакетов и применяемых моделей. На рисунке 3 изображены конкурирующие схемы конформационного поиска, проводимого с предварительной оптимизацией методами низкого уровня теории (базисными наборами Попла *CBSB7*: 6-311G(2d,d,p) при использовании пакета Gaussian и 6-311G(2d,2p) при использовании пакета Orca). Веса рёбер графа соответствуют времени, затраченному на весь пакет данных в часах.

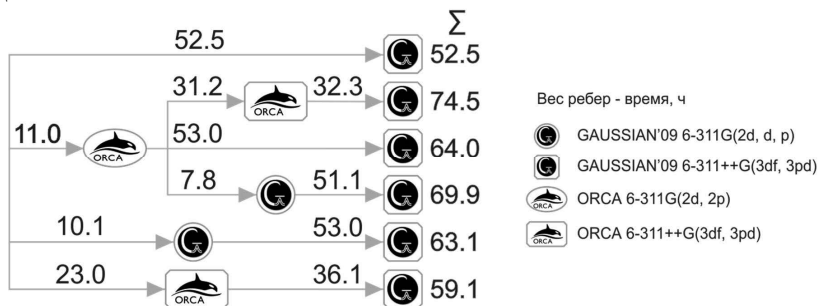


Рис. 3. Исследуемые схемы конформационного поиска.

Анализ рисунка 3 позволяет заключить, что:

- моделирование на высоком уровне теории в пакете Orca выполняется 2.25 раза быстрее по сравнению с пакетом Gaussian. При этом отсутствуют значимые, на уровне химической точности, отклонения в получаемых значениях энергии реакций;
- выполнение предварительных оптимизаций не повышает, а скорее только снижает производительность конформационного поиска;
- затраты времени на их выполнение для выбора лучших начальных данных оправданы лишь при наличии корреляции значений, получаемых методами высоких и низких уровней теории, и достаточной доли отсеиваемых вариантов.
- При невысокой корреляции или ее отсутствии (что довольно часто имеет место на практике [8]), либо в случаях исследования всех геометрических конфигураций – предоптимизация нецелесообразна.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 22-19-00794.

### Список литературы

1. <https://gaussian.com/>
2. <https://orcaforum.kofo.mpg.de/>
3. Назаренко К. М., Коробов Н. А., Надыкто А. Б., Кириллова Л. Н. Комплексное исследование производительности проблемно-ориентированных вычислительных GRID-систем для моделирования наноструктур и наноматериалов. // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 8. С. 22 – 28. DOI:10.14489/vkit.2016.08.pp.022-028
4. Назаренко Е.С. и др. Статистическое оценивание производительности конформационного поиска // Самарские чтения (в память об академике А.А. Самарском). - 2022. - С. 183. ISBN-978-5-8037-0841-4
5. Назаренко Е.С. Особенности моделирования формирования газофазных гидратов в атмосфере. // Естественные и технические науки. 2017. №9. С. 83-91.
6. Temelso B. et al. Quantum mechanical study of sulfuric acid hydration: atmospheric implications //The Journal of Physical Chemistry A. – 2012. – Т. 116. – №. 9. – С. 2209-2224. <https://doi.org/10.1021/jp2119026>
7. Perdew, J. P. Accurate and simple analytic representation of the electron-gas correlation energy / J. P. Perdew, Y. Wang // Physical Review B. – 1992. – Т. 45. – №. 23. – С. 13244.
8. Коробов Н. А., Назаренко Е. С., Назаренко К.М., Марков П. Н., Надыкто А. Б. Анализ согласованности квантово-химических методов конформационного поиска – Тезисы докладов XXVIII международной конференции «Математика. Компьютер. Образование», 2021, с. 53. ISBN 978-5-4344-0924-7

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕАКЦИЯ-ДИФфуЗИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Ю.А. Незнанов

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Базовой математической моделью среды, где возможны процессы пространственно-временной самоорганизации, является нелинейное уравнение «реакция–диффузия» (УРД) вида:

$$\frac{\partial}{\partial t} c(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial}{\partial x} c(x, t) + f(x, t).$$

В смысле интерпретации при решении уравнения диффузии речь идет о нахождении зависимости концентрации вещества (или иных объектов) от пространственных координат и времени, причем задан коэффициент (в общем случае также зависящий от пространственных координат и времени), характеризующий проницаемость среды для диффузии.

Рассмотрим задачу реакции-диффузии для 2 компонентов, примем  $D = \text{const}$ , тогда, для обучения нейронной сети нужно задать следующие данные: начальные и граничные условия, функцию ошибки. Архитектура нейронной сети: двухслойный перцептрон, активация – сигмоида, один выходной нейрон  $N(x, p)$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = f\left(x, \psi, \frac{d\psi}{dx}\right), x \in [a, b],$$

Начальные условия:

$$\psi(a) = A \psi'(a) = A'$$

Решение нейронной сети:

$$\psi_i(x, p) = A + A'(x - a) + (x - a)^2 N(x, p),$$

Функция ошибки:

$$E(p) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{d^2 \psi_i(x_i, p)}{dx^2} - f\left(x_i, \psi_i(x_i, p), \frac{d\psi_i}{dx}\right) \right)^2$$

Правила обновления весов:

$$w_{\mu}^{n+1} = w_{\mu}^n - \eta \left( \frac{\partial E}{\partial w_{\mu}} \right),$$

## Список литературы

1. Васильев А.Н., Тархов Д.А. Нейросетевой подход к задачам математической физики. — М.: Физматлит, 2016. — 60 с.
2. Демидов С. С. Возникновение теории дифференциальных уравнений с частными производными — М.: Физматлит, 2014. — 620 с.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОПОЛНЕНИЙ ДЛЯ КОРРЕКТИРОВКИ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ОБЪЕКТОВ НА МЕСТНОСТИ

С.А. Никитин-Кошкин<sup>1</sup>, К.Э. Никитина-Кошкина<sup>2</sup>, Г.В. Кошкина<sup>3</sup>, Е.Е. Фомина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Тверской ГМУ Минздрава России  
170100, г. Тверь, ул. Советская, д. 4  
email: www.nikitin1997@gmail.com

<sup>2</sup> Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по  
Тверской области  
170100, г. Тверь, ул. Советская, 35  
email: kris22t@rambler.ru

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»  
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22  
Тел.: +7 (4822) 78-91-90

Развитие экономики государства, его международный авторитет и обороноспособность не в последнюю очередь зависят от уровня развития координатно-временных и навигационных технологий. Одними из основных средств системы радиолокации являются многоканальные мобильные радиолокационные системы (РЛС) средней дальности, занимающие определенные позиционные районы. Для эффективного применения РЛС необходима подготовка позиционных районов в топогеодезическом отношении и геодезической привязке элементов РЛС на занимаемых позициях. При этом время, отводимое на привязку должно быть минимальным.

Задача увеличения точности топографической привязки объектов на местности с использованием спутниковых радионавигационных систем (СРНС), позволяющих оперативно получать высокоточные значения координат объектов крайне актуальна, т.к. прием радионавигационных сигналов с навигационных космических аппаратов (НКА) зависит от множества факторов (преднамеренные и непреднамеренные помехи, взаимное расположение НКА и потребителей информации, условия распространения радиоволн от НКА к потребителю и т.д.).

В этих условиях использование существующих средств топ привязки (топопривязчиков) не позволяет своевременно выполнять привязку элементов мобильных РЛС, что обуславливает необходимость поиска альтернативных источников координатной информации.

В качестве таких источников целесообразно рассмотреть спутниковую радионавигационную систему (СРНС) ГЛОНАСС, имеющую потенциальную возможность оперативного получения высокоточных значений координат объектов.

Формируемое системой глобальное радионавигационное поле позволяет подвижным объектам, оснащенным навигационной аппаратурой потребителя оперативно определять (уточнять) свое местоположение (три координаты), параметры своего движения (три составляющие вектора скорости) и точное время [1]. В настоящее время поддержание высокой точности навигационных определений в системе

ГЛОНАСС имеет особое значение с точки зрения обеспечения независимости отечественных потребителей от зарубежных космических навигационных систем (КНС) (GPS, Galileo) и создания условий для осуществления полнофункциональных навигационных определений только по сигналам системы ГЛОНАСС.

Существует возможность уменьшить влияние условий, ухудшающих работу ГЛОНАСС за счет реализации дифференциального режима работы СРНС путем расширения ее функциональных дополнений.

В настоящее время существует несколько типов функциональных дополнений, имеющих различные возможности повышения качественных характеристик навигационных измерений и различную стоимость, что обуславливает необходимость обоснованного выбора наиболее предпочтительного варианта их реализации для повышения эффективности решения задач топ привязки элементов РЛС.

Можно отметить несоответствие практического характера между необходимостью повышения эффективности решения задач топопривязки элементов РЛС и недостаточными мерами по повышению возможностей ГЛОНАСС в позиционном районе путем реализации функциональных дополнений СРНС.

Цель работы: повысить точность и надежность навигационных измерений в приемной аппаратуре СРНС за счёт выбора рационального варианта средств функциональных дополнений системы ГЛОНАСС в позиционном районе элементов РЛС.

Анализ имеющихся недостатков и вскрытых факторов, влияющих на эффективность решения задач топопривязки элементов РЛС, позволил сформулировать цель исследования, заключающуюся в повышении эффективности решения задач топопривязки элементов РЛС за счет обоснования и выбора варианта функциональных дополнений ГЛОНАСС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать факторы, влияющие на эффективность решения задач топопривязки средств мобильных РЛС;
- разработать методику определения варианта средств функциональных дополнений системы ГЛОНАСС для решения задач топопривязки средств РЛС;
- разработать программы выбора варианта средств функциональных дополнений системы ГЛОНАСС в позиционном районе средств РЛС.

В процессе исследования используется теория информации и теория вероятности.

Значимость работы заключается в дальнейшем развитии методов теории принятия решений в части методов выбора альтернатив средств функциональных дополнений системы ГЛОНАСС.

Практическая значимость работы заключается в том, что с помощью разработанной программы возможен выбор варианта средств функциональных дополнений, позволяющий повысить эффективность решения задач топопривязки элементов РЛС.

### **Список литературы**

1. Любушкин М.С. Методы анализа и оценки эффективности боевых действий Войск ПВО страны. – Калинин: ВКА ПВО, 1977. – 304 с.

# МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**К.Э. Никитина-Кошкина<sup>1</sup>, С.А. Никитин-Кошкин<sup>2</sup>,  
Г.В. Кошкина<sup>3</sup>, Н.А. Стукалова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по  
Тверской области  
170100, г. Тверь, ул.Советская, 35  
email: kris22t@rambler.ru

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Тверской ГМУ Минздрава России  
170100, г. Тверь, ул. Советская, д. 4

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»  
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22  
Тел.: +7 (4822) 78-91-90

Процессы контроля воздушного пространства и управления воздушным движением требуют больших вычислительных мощностей для непрерывной обработки координат и характеристик движущихся воздушных объектов, полученных обзорной радиолокационной станцией (РЛС) [1].

В условиях наблюдения за множеством высокоскоростных воздушных целей, человек-оператор не в состоянии оперативно оценивать не однообразность сложившейся обстановки и производить обработку, получаемой с РЛС информации, с помощью только визуальных индикаторов.

Необходимость передачи части или всех функций человека-оператора на рассматриваемых процессах вычислительным устройствам приводит к решению о построении автоматизированной системы обработки радиолокационной информации.

При проектировании автоматизированных систем обработки радиолокационной информации (РЛИ) определяют задачи, решаемые в таких системах. Эти задачи сводятся к:

- обнаружению сигналов (отметок), отраженных от интересующих нас движущихся объектов (целей);
- оценке координат обнаруженных целей;
- обнаружению траекторий целей по совокупности отметок, полученных в ряде периодов обзора РЛС;
- вычислению параметров движения целей (скорости, курса и т. д.) и нахождению на этой основе сглаженных и упрежденных на некоторый отрезок времен и координат.

Выбранная тема актуальна, поскольку средства противовоздушной обороны применяются и совершенствуются по настоящее время. Кроме того, оценка достоверности отметок от цели уменьшает риски пропуска цели и ложной тревоги, а также позволяет сократить количество наблюдений, за счет чего можно сократить на время принятия решения.

Цель работы – повысить оперативность принятия решения за счет использования методики обнаружения траектории летательного аппарата, основанной на последовательном анализе с элементами нечеткого логического вывода.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- исследовать систему траекторной (вторичной) обработки радиолокационной информации;
- проанализировать современные методы обнаружения траектории летательного аппарата;
- разработать методику обнаружения траектории летательного аппарата на основе последовательного анализа с элементами нечеткого логического вывода;
- провести анализ результатов обнаружения траектории летательного аппарата.

Входные данные моделируются методом Монте-Карло.

В работе используются элементы теории вероятностей, математической статистики и нечеткой логики, имитационное моделирование методом Монте-Карло.

### **Список литературы**

1. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио., 1974.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ХИМИЧЕСКИХ ИНГРЕДИЕНТОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА – ВОДА - РАСТЕНИЯ

А.Н. Николаенко

## MATHEMATICAL MODELING OF MASS TRANSFER PROCESSES OF ION-SALT FORMS IN WATER-SOIL SYSTEMS

A.N. Nikolaenko

ВНИИ Гидротехники и Мелиорации им. А.Н. Костякова, Москва, РФ

127434, ул. Б. Академическая, 44 к.2

Тел.: 8(499)153 06 91 E-mail: al.nikolaenko@yandex.ru

Разработка и использование математических моделей является важным инструментом исследованием процессов и систем. Рассмотрен алгоритм разработки математических моделей

В работе излагаются подходы, которые применяются при математическом моделировании переноса химических ингредиентов в почвах при воздействии оросительной воды и формирования среды для роста растений, что является важными задачами почвоведения, агрохимии, мелиорации.

Объект исследования - почва сложный объект, представляет собой многофазную дисперсную среду, в которой соответствующие вещества находятся в твердом, жидком и газообразном состояниях, что создает определенные трудности в математической постановки задач.

Математическое моделирование солевого режима почв может базироваться на различных подходах. Один из них состоит в применении уравнений термодинамики необратимых процессов для описания различных потоков вещества и энергии в почве. Причиной возникновения потоков является неоднородность температуры, давления, растворенного вещества, влаги, потенциалов внешних полей. В этом случае величины соответствующих потоков описывается системой уравнений вида

$$J_i = \sum L_{ik} X_k,$$

где  $J_i$  – потоки вещества, тепла, влаги, давления и т.д.;  $L_{ik}$  – кинетические коэффициенты, полученные из опыта или расчетным путем;  $X_k$  – термодинамические силы, определяемые градиентами соответствующих величин. Набор кинетических коэффициентов  $L_{ik}$  представляет собой матрицу числовых значений, определяющую, собственно, поток при  $i=j$ , или взаимное влияние потоков при  $i \neq k$ .

Данный подход не нашел практического применения к математическому описанию такой сложной системы, как почва, ввиду существованию нелинейной зависимости между кинетическими коэффициентами  $L_{ij}$  и термодинамическими силами  $X$  и сложностью решения получаемых систем уравнений.

Другим подходом для прогнозных оценок солепереноса и процесса формирования состава ПР в почвах является подход, основанный на применении уравнения конвективной диффузии вида:

$$\frac{\partial(wc)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - V \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$



и различные его модификации, отражающие те или иные особенности и эффекты солепереноса. В уравнении (1) введены следующие обозначения:  $x$  – координата,  $t$  – время,  $c$  – концентрация,  $w$  – объемная влажность почвы,  $D$  – коэффициент конвективной диффузии,  $V$  – скорость потока влаги. Это уравнение предполагает решение – получение функции  $c = c(x, t)$ .  $V$  – должна быть задана экспериментально или получена из решения уравнений влагопереноса. Основу влагопереноса составляют базовые гидрофизические характеристики почвы: зависимости объемной влажности от капиллярно-сорбционного потенциала или всасывающего давления, зависимости коэффициента влагопроводности от влажности или всасывающего давления, зависимости весовой влажности от объемной влажности, зависимости коэффициента осматического влагопереноса от всасывающего давления

Для более полного описания солевого и пищевого режимов почв предложены аналоги уравнения (1), которые включают в себя систему уравнений массопереноса основных компонентов ионо-солевого комплекса почв с учетом их физико-химического взаимодействия. Формализуются начальные и граничные условия, соответствующие протеканию различных процессов и их направленности. Системы дифференциальных уравнений переводятся в конечно разностный аналог и решаются численными методами с использованием ЭВМ. Приводятся сопоставление полученных решений с опытными данными.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЭМУЛЯЦИИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ

Е.А. Павлов

## RESEARCH OF SIMULATION MODELING METHODS AND DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR EMULATING THE CONNECTION OF NETWORK DEVICES

E. A. Pavlov

МГТУ «Станкин», Москва, Россия  
127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: (+7 916)453-80-35, e-mail: [egor100701@gmail.com](mailto:egor100701@gmail.com)

Моделирование — это процесс создания упрощенного представления реальной системы или процесса для изучения её характеристик, поведения и взаимодействия с окружающей средой. Оно используется в различных областях для анализа, прогнозирования и принятия решений. [1] Имитационное моделирование является предпочтительным средством для разработки средств эмуляции сетевых устройств по следующим причинам [2, 3]:

- Имитационное моделирование позволяет создать виртуальную среду, которая точно эмулирует работу реальных сетевых устройств, их взаимодействие и поведение в различных сценариях. Это позволяет проводить тестирование и отладку программного обеспечения в условиях, максимально приближенных к реальным, без физического оборудования.
- Имитационные модели сетевых устройств позволяют легко создавать различные топологии сетей, изменять параметры и условия среды, моделировать разные типы устройств и протоколов. Это делает их гораздо более гибкими и масштабируемыми по сравнению с физическим оборудованием.
- Использование имитационного моделирования позволяет избежать затрат на приобретение, обслуживание и хранение физических сетевых устройств, что является экономически выгодным и позволяет сократить расходы на тестирование и разработку.

На текущий момент существует несколько систем эмуляции подключения сетевых устройств, которые используются для создания виртуальных сред, имитирующих работу реальных сетевых конфигураций. Эти системы эмуляции предоставляют различную функциональность для создания виртуальных сетевых сред, и у каждой есть уникальные особенности. Для того, чтобы определить требования к идеальной системе эмуляции, разберём преимущества и недостатки существующих систем [4]:

GNS3 – популярная открытая платформа, которая позволяет создавать виртуальные сети с использованием реального оборудования или образов оборудования. GNS3 предоставляет графический интерфейс для создания и настройки сетевых топологий и позволяет создавать сложные виртуальные сетевые топологии с участием различных устройств от разных производителей, но образы для оборудования Cisco должны быть предоставлены пользователем. И хотя основной функционал GNS3

бесплатен, для поддержки облачных услуг, некоторых возможностей виртуальной машины GNS3 VM и расширенных возможностей моделирования требуется платная подписка. Также для моделирования крупных и сложных сетей может требоваться значительное количество вычислительных ресурсов. К тому же большое количество параметров для настройки моделирования может создать сложности для новичков.

Cisco Packet Tracer - инструмент, разработанный компанией Cisco, который используется для обучения сетевых специалистов и тестирования сетевых конфигураций. Программа поддерживает большинство устройств и технологий от Cisco. Также Packet Tracer обладает удобным графическим интерфейсом, что делает создание и настройку сетевых топологий более интуитивно понятным, особенно для начинающих пользователей. Для студентов и людей, занимающихся самообразованием в области сетевых технологий, Packet Tracer предоставляется бесплатно или доступен по программам академической поддержки Cisco. Но несмотря на то, что Packet Tracer предлагает широкий спектр функций, одним из основных его ограничений является отсутствие возможности моделировать оборудование от других производителей, что может быть ограничивающим фактором для тех, кто работает с различными технологиями. Также Packet Tracer может оказаться менее эффективным при моделировании сложных сетей из-за ограниченных ресурсов и производительности программы. К тому же, на данный момент Cisco не предоставляет возможности использования Packet Tracer в России.

VIRL (Virtual Internet Routing Lab) – это инструмент от Cisco, который предоставляет больше возможностей по сравнению с Cisco Packet Tracer. VIRL позволяет эмулировать роутеры, коммутаторы, брандмауэры Cisco и поддерживает большое количество протоколов. Но у VIRL, помимо необходимости платной подписки, присутствуют те же недостатки, что у Cisco Packet Tracer: работа только с устройствами Cisco, ограничение работы с большим количеством устройств, высокие требования к производительности устройства, отсутствие возможности работы с программой в России.

На основе рассмотренных систем выделим общие преимущества и все недостатки, которые необходимо учесть при разработке идеальной системы эмуляции. Общими преимуществами являются:

- Обеспечение максимально точного моделирования работы реального сетевого оборудования, включая его функциональность, поведение протоколов и реакцию на различные сценарии работы.
  - Способность обеспечить возможность тестирования сценариев работы сети в реальном времени.
- Недостатками, в свою очередь, являются следующие качества:
- Невозможность использования оборудования от различных производителей, необходимость поиска нужных образов пользователем.
  - Отсутствие обучающего режима или перегруженный интерфейс, который затрудняет создание и настройку сетевых топологий и усложняет процесс моделирования.
  - Система не обеспечивает эффективную работу и высокую производительность при моделировании сложных сетевых конфигураций.
  - Система не стремится минимизировать требования к вычислительным ресурсам и скорость работы становится сильно зависимой от мощностей оборудования.

- Доступность ограничена платной подпиской, отсутствуют бесплатные версии или бесплатный доступ для учебных целей, а также ограничено использование программы в определенных странах.

Рассмотрим постановку задачи реализации приложения для данной системы более подробно. Для разработки этой системы необходимо предусмотреть следующие детали:

- Требования к системе,
- Определение средств разработки задачи,
- Разработка интерфейса,
- Структура системы,
- Тестирование системы,

Необходимо определить требования, которые должна удовлетворять система для того, чтобы она была полезной и эффективной. Например, производительность приложения, уровень безопасности работы с данными, способы хранения данных, возможность расширения приложения и способы для расширения, например, добавление новых функций и обновление существующих.

После установки требований системы, требуется определить средства разработки задачи, с помощью которых будут достигаться поставленные требования. Этот шаг заключается в том, что необходимо оценить различные средства и технологии и выбрать наиболее подходящие из них. Для этого нужно определить то, какие функции должно иметь приложение, какие данные будут использоваться, как пользователи будут взаимодействовать с приложением и как приложение с помощью интерфейса должно реагировать на действия пользователя. Требуется выбрать инструментарий, позволяющий сочетать удобство разработки с возможностью обеспечить поставленные для разработки системы требования.

Сложность разработки интерфейса заключается в том, что интерфейс системы должен быть интуитивно понятным и удобным для использования. Он должен быть спроектирован таким образом, чтобы пользователи могли быстро и легко выполнять нужные им действия. Примером простого и удобного интерфейса для эмулятора может послужить внешний вид Cisco Packet Tracer (рис. 1.1). На нём отображена панель возможных для подключения устройств, рабочая область, в которой можно проводить соединения между устройствами и настраивать их и образовательные материалы, и задания, помогающие пользователям изучать сетевые концепции.



Рис. 1.1. Интерфейс Cisco Packet Tracer.

Необходимо определить структуру системы. Структура системы эмулятора подключения сетевых устройств, реализованного с помощью веб приложения, изображена на рис. 1.2. Она включает в себя:

- Пользовательский интерфейс веб-приложения, который представляет собой окружение для создания и управления виртуальными сетевыми топологиями. Он должен включать в себя панель инструментов, позволяющую добавлять и настраивать виртуальные устройства, рабочую область для создания сетевых топологий, меню с настройками устройств и соединений, меню для изменения настроек и конфигураций, функции мониторинга сети для анализа ее работы, а также возможности обучения и образовательные ресурсы для изучения основ сетевых технологий.
- Серверную часть веб-приложения, включающую в себя логику моделирования работы устройств с возможностью функционирования системы при работе с крупными сетевыми топологиями, обеспечение безопасности данных пользователей, добавление, редактирование и удаление записей в базе данных. Эта часть приложения является основой функционирования системы.
- Процесс взаимодействия между клиентской и серверной частями, который представляет собой следующий цикл действий: клиентская часть инициирует действие, например, изменение параметров устройства. Этот запрос отправляется от клиента к серверу посредством протокола HTTP. Серверная часть системы принимает запрос от клиента и анализирует его содержание, проверяет корректность данных и проводит аутентификацию запроса. Если предоставленный токен аутентификации совпадает с сохраненным, сервер подтверждает подлинность пользователя и позволяет выполнить запрос. Далее выполняется операция в соответствии с запросом и сервер формирует ответ, содержащий результат операции или запрошенную информацию, и отправляет его обратно клиенту. Получив ответ от сервера, клиентская часть приложения обрабатывает его и отображает результаты операции или запрашиваемую информацию пользователю, обновляя пользовательский интерфейс.
- Базу данных, используемую для хранения информации о конфигурациях устройств пользователей и их учетных записях. База данных обеспечивает постоянное хранение данных, позволяя пользователям сохранять и загружать созданные ими параметры сети для последующего использования. Это позволит пользователям возвращаться к своим проектам и продолжать работу с сохраненными данными.



Рис. 1.2. Структурная схема устройства эмулятора

Обязательным этапом разработки программ является тестирование, которое позволяет выявить допущенные ошибки. Перед внедрением системы необходимо провести проверку её работоспособности на различных этапах разработки.

### Список литературы

1. Кулешов Игорь Анатольевич, Дуплинский Михаил Александрович, Малахов Юрий Анатольевич, Анализ методов моделирования сетей связи // Санкт-Петербург: Информатика, телекоммуникация и управление – 2010 - Выпуск 2 - С. 148-152.
2. Тянь Константин Львович, Аналитические, статистические и имитационные модели: преимущества и недостатки // Санкт-Петербург: International scientific review – 2020 – номер 70.
3. В.Н. Сидоренко, А.В. Красносельский, Имитационное моделирование в науке и бизнесе: подходы, инструменты, применение // Москва: Бизнес-информатика – 2009 – номер 2 - С. 52-57.
4. GNS3 / Documentation [Электронный ресурс] // Galaxy Technologies LLC. URL: <https://docs.gns3.com/docs/>.

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

**Н.В. Петров, Е.М. Красикова**

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»  
127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1

В современном мире нейронные сети применяются практически во всех сферах деятельности, связанных с обработкой информации. Одним из интересных направлений исследований является взаимодействие нейронных сетей различных типов, которое может привести к значительному улучшению их эффективности и точности.

Одним из способов взаимодействия нейронных сетей является использование ансамблей. Ансамбль – это группа нейронных сетей, работающих вместе и обменивающихся информацией. Такой подход позволяет получать более точные результаты, чем если бы каждая сеть работала отдельно.

Еще одним способом взаимодействия нейронных сетей является их комбинирование в единую архитектуру. Например, можно соединить сверточную нейронную сеть (CNN) и рекуррентную нейронную сеть (RNN) для решения задачи распознавания речи. Сверточная сеть будет отвечать за обработку аудиосигнала, а рекуррентная – за распознавание речи.

Также существуют методы взаимодействия нейронных сетей различных типов, основанные на обучении с подкреплением. Например, можно обучить одну сеть, которая будет принимать решение, а другую – помогать ей принимать решения в определенных ситуациях.

Наконец, одним из самых перспективных направлений взаимодействия нейронных сетей различных типов является обучение с подкреплением между ними. В этом случае две или более нейронные сети обмениваются информацией и учатся друг у друга. Этот подход может привести к существенному улучшению эффективности и точности решения задач.

В заключение, можно сказать, что взаимодействие нейронных сетей различных типов – это очень интересное и перспективное направление исследований. Его применение может привести к улучшению эффективности и точности решения задач во многих областях, связанных с обработкой информации.

## Список литературы

1. Никищечкин А.П. Нейросетевые технологии. М.: ИЦ ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2010.–124с.

# СВЯЗЬ СИСТЕМЫ ГЕНЕТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ С СЕМЕЙСТВОМ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОДОВ ГРЕЯ

С.В. Петухов

## RELATIONSHIP OF THE GENETIC CODING SYSTEM WITH THE FAMILY OF CYCLIC GRAY CODES

S.V. Petoukhov

Институт машиноведения им. А.А. Благодного РАН,

Москва, Россия

101990, М.Харитоньевский переулок, 4

Tel.: +7915-092-85-65, e-mail: spetoukhov@gmail.com

**Аннотация.** Тезисы посвящены исследованию связей генетически наследуемого множества взаимно связанных циклических физиологических процессов с иерархическим семейством циклических  $n$ -битных кодов Грея. Отмечается сопряжение этого вида циклических кодов с системой молекулярно-генетического кодирования и универсальными правилами статистической организации информационных последовательностей однонитевых ДНК в геномах высших и низших организмов. Подчеркивается перспективность моделирования и анализа структур генетической информатики и генетического наследования циклических физиологических процессов на базе семейств  $n$ -битных кодов Грея.

**Ключевые слова:** ДНК, генетическое кодирование, код Грея, циклические структуры, алфавиты, геномные последовательности, статистический анализ.

**Введение.** Создатели квантовой механики П. Йордан и Э. Шредингер указывали на ключевое отличие живых тел от неодушевленных: неодушевленные объекты управляются средним случайным движением их миллионов частиц и движение отдельных частиц не существенно для целого; напротив, в живом организме избранные – генетические – молекулы обладают диктаторским влиянием на весь организм за счет квантового усиления (см. историю «квантовой биологии» [1]). Соответственно, исследования автора направлены на познание секретов и патентов живой природы на основе исследования структурных особенностей семейства алфавитов геномных ДНК, а также информационных последовательностей геномных ДНК высших и низших организмов. При этом особое внимание уделяется генетическому наследованию циклических процессов.

Живой организм представляет собой огромный хор генетически наследуемых циклических процессов, взаимная скоординированность которых сохраняется на протяжении всего его онтогенетического развития. Например, наследуемые белки нашего тела включены в непрерывные циклы «жизнь-смерть» сборки и разборки их на аминокислоты. Так, период полураспада гормона инсулина равен 6-9 минут. Другими словами, генетически наследуемые части нашего тела постоянно умирают и возрождаются циклическим образом. В этой связи известный физиолог А.Г. Гурвич указывал, что основной проблемой биологии является поддержание формы при постоянном обновлении субстрата [2].

Другим показательным примером циклической организации в живом является метаморфоз бабочек, состоящий из стадий бабочка-яйцо-гусеница-куколка-бабочка. Характерно, что бабочку никто не учит, как ей выбраться из куколки и начать летать,



но она выбирается и начинает летать за счет наследуемых волновых движений крыльями (волновая генетическая биомеханика). Все необходимое для этого уже имеется в ее геномной информатике. При этом на стадии куколки бабочка ничем не питается, то есть ее атомарное содержание фиксировано с начала образования куколки. Но за счет каких-то генетически определенных перестановок в этом ансамбле атомов в итоге возникает новый организм-бабочка.

Подобные факты позволяют полагать, что система генетического кодирования обеспечивает наследование кодированных циклических процессов на основе каких-то циклических кодов. Но в современной теории связи и математике кодирования информации имеется обширное множество видов циклических кодов, которые в силу уникальных свойств считаются особо ценным достоянием теории кодирования [3, с. 68]. Какой же именно вид циклических кодов по своим особенностям соответствует структурной организации системы генетического кодирования и характерным статистическим закономерностям информационных последовательностей геномных ДНК высших и низших организмов? Автором получен ряд результатов в пользу важной роли семейства циклических кодов Грея для моделирования и анализа генетической информатики, включая систему генетического кодирования. Задачей этих тезисов является краткое представление этих результатов, связанных с развитием генетической биомеханики, алгебраической биологии и искусственного интеллекта геноморфного типа.

**Матрицы алфавитов ДНК и коды Грея.** Алфавит 4 нуклеотидов ДНК, состоящий из аденина А, тимина Т, цитозина С и гуанина G, является носителем системы бинарно-оппозиционных признаков:

- 1) два из этих нуклеотидов являются пуринами (А и G), а два другие (С и Т) – пиримидинами, что дает представление  $C = T = 0, A = G = 1$ ;
- 2) два из этих нуклеотидов являются кето-молекулами (Т и G), а два другие (С и А) – амино-молекулами, что дает представление  $C = A = 0, T = G = 1$ .

В силу этого ДНК-алфавиты 4 букв, 16 дуплетов и 64 триплетов представляются в форме квадратных таблиц (Рис. 1), столбцы которых нумеруются бинарными индикаторами «пиримидин или пурин» ( $C=T=0, A=G=1$ ), располагаемыми в очередности членов взаимно связанных кодов Грея, показанных ниже в матрицах курсивом: 1-битового (0, 1), 2-битового (00, 01, 11, 10) и 3-битового (000, 001, 011, 010, 110, 111, 101, 100). Строки этих матриц нумеруются бинарными индикаторами «амино или кето» ( $C=A=0, T=G=1$ ), также располагаемыми в очередности тех же 1-битового, 2-битового и 3-битового кодов Грея. В таких таблицах все буквы, дуплеты и триплеты автоматически занимают строго индивидуальное место. Каждая ячейка в этих матрицах, а также n-плет в ней нумеруется конкатенацией (соединением) бинарных номеров ее строки и столбца. Очередность бинарной нумерации всех ячеек по Грею в этих трех матрицах соответствует 2-битному, 4-битному и 6-битному кодам Грея (напомним, что два соседних члена бинарного кода Грея отличаются ровно в одном разряде, то есть расстояние Хэмминга между ними равно 1). При этом последовательность номеров ячеек от строки к строке имеет вид змейки. Общая нумерация ячеек в каждой матрице является кодом Грея соответствующей битности.

Как же в так построенной матрице 64 триплетов располагаются кодируемые ими аминокислоты и стоп-кодоны? Это расположение нельзя предсказать, поскольку аминокислоты и нуклеотиды А, С, G, Т совершенно различны по строению. Число вариантов расположения аминокислот с их какими-то повторениями для заполнения всей (8\*8)-матрицы необозримо:  $\gg 10^{100}$  (для сравнения в физике время существования Вселенной оценивается в  $10^{17}$  секунд). Будет ли это расположение хаотичным или

вдруг окажется закономерно симметричным? На Рис. 1 показан случай генетического кода митохондрий позвоночных, который считается наиболее древним и симметричным.

	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>0</i>	<b>C</b> 00(0)	<b>A</b> 01(1)
<i>1</i>	<b>T</b> 10(3)	<b>G</b> 11(2)

	<i>00</i> (0)	<i>01</i> (1)	<i>11</i> (2)	<i>10</i> (3)
<i>00</i>	<b>CC</b> 0000 (0)	<b>CA</b> 0001 (1)	<b>AA</b> 0011 (2)	<b>AC</b> 0010 (3)
<i>01</i>	<b>CT</b> 0100 (7)	<b>CG</b> 0101 (6)	<b>AG</b> 0111 (5)	<b>AT</b> 0110 (4)
<i>11</i>	<b>TT</b> 1100 (8)	<b>TG</b> 1101 (9)	<b>GG</b> 1111 (10)	<b>GT</b> 1110 (11)
<i>10</i>	<b>TC</b> 1000 (15)	<b>TA</b> 1001 (14)	<b>GA</b> 1011 (13)	<b>GC</b> 1010 (12)

	<i>000</i> (0)	<i>001</i> (1)	<i>011</i> (2)	<i>010</i> (3)	<i>110</i> (4)	<i>111</i> (5)	<i>101</i> (6)	<i>100</i> (7)
<i>000</i> (0)	<b>CCC</b> <b>Pro</b> 000000 (0)	<b>CCA</b> <b>Pro</b> 000001 (1)	<b>CAA</b> <b>Gln</b> 000011 (2)	<b>CAC</b> <b>His</b> 000010 (3)	<b>AAC</b> <b>Asn</b> 000110 (4)	<b>AAA</b> <b>Lys</b> 000111 (5)	<b>ACA</b> <b>Thr</b> 000101 (6)	<b>ACC</b> <b>Thr</b> 000100 (7)
<i>001</i> (1)	<b>CCT</b> <b>Pro</b> 001000 (15)	<b>CCG</b> <b>Pro</b> 001001 (14)	<b>CAG</b> <b>Gln</b> 001011 (13)	<b>CAT</b> <b>His</b> 001010 (12)	<b>AAT</b> <b>Asn</b> 001110 (11)	<b>AAG</b> <b>Lys</b> 001111 (10)	<b>ACG</b> <b>Thr</b> 001101 (9)	<b>ACT</b> <b>Thr</b> 001100 (8)
<i>011</i> (2)	<b>CTT</b> <b>Leu</b> 011000 (16)	<b>CTG</b> <b>Leu</b> 011001 (17)	<b>CGG</b> <b>Arg</b> 011011 (18)	<b>CGT</b> <b>Arg</b> 011010 (19)	<b>AGT</b> <b>Ser</b> 011110 (20)	<b>AGG</b> <b>Stop</b> 011111 (21)	<b>ATG</b> <b>Met</b> 011101 (22)	<b>ATT</b> <b>Ile</b> 011100 (23)
<i>010</i> (3)	<b>CTC</b> <b>Leu</b> 010000 (31)	<b>CTA</b> <b>Leu</b> 010001 (30)	<b>CGA</b> <b>Arg</b> 010011 (29)	<b>CGC</b> <b>Arg</b> 010010 (28)	<b>AGC</b> <b>Ser</b> 010110 (27)	<b>AGA</b> <b>Stop</b> 010111 (26)	<b>ATA</b> <b>Met</b> 010101 (25)	<b>ATC</b> <b>Ile</b> 010100 (24)
<i>110</i> (4)	<b>TTC</b> <b>Phe</b> 110000 (32)	<b>TTA</b> <b>Leu</b> 110001 (33)	<b>TGA</b> <b>Trp</b> 110011 (34)	<b>TGC</b> <b>Cys</b> 110010 (35)	<b>GGC</b> <b>Gly</b> 110110 (36)	<b>GGA</b> <b>Gly</b> 110111 (37)	<b>GTA</b> <b>Val</b> 110101 (38)	<b>GTC</b> <b>Val</b> 110100 (39)
<i>111</i> (5)	<b>TTT</b> <b>Phe</b> 111000 (47)	<b>TTG</b> <b>Leu</b> 111001 (46)	<b>TGG</b> <b>Trp</b> 111011 (45)	<b>TGT</b> <b>Cys</b> 111010 (44)	<b>GGT</b> <b>Gly</b> 111110 (43)	<b>GGG</b> <b>Gly</b> 111111 (42)	<b>GTG</b> <b>Val</b> 111101 (41)	<b>GTT</b> <b>Val</b> 111100 (40)
<i>101</i> (6)	<b>TCT</b> <b>Ser</b> 101000 (48)	<b>TCG</b> <b>Ser</b> 101001 (49)	<b>TAG</b> <b>Stop</b> 101011 (50)	<b>TAT</b> <b>Tyr</b> 101010 (51)	<b>GAT</b> <b>Asp</b> 101110 (52)	<b>GAG</b> <b>Glu</b> 101111 (53)	<b>GCG</b> <b>Ala</b> 101101 (54)	<b>GCT</b> <b>Ala</b> 101100 (55)
<i>100</i> (7)	<b>TCC</b> <b>Ser</b> 100000 (63)	<b>TCA</b> <b>Ser</b> 100001 (62)	<b>TAA</b> <b>Stop</b> 100011 (61)	<b>TAC</b> <b>Tyr</b> 100010 (60)	<b>GAC</b> <b>Asp</b> 100110 (59)	<b>GAA</b> <b>Glu</b> 100111 (58)	<b>GCA</b> <b>Ala</b> 100101 (57)	<b>GCC</b> <b>Ala</b> 100100 (56)

Рис. 1. Генетические матрицы 4 нуклеотидов, 16 дуплетов и 64 триплетов с бинарной нумерацией столбцов и строк, упорядоченной в соответствие с 1-битным, 2-битным и 3-битным кодами Грея. Каждая ячейка имеет бинарный номер, образованный конкатенацией номеров ее строки и столбца и читаемый как номер соответствующего кода Грея. В круглых скобках указаны десятичные эквиваленты бинарных чисел кодов Грея. В матрице 64 триплетов кодируемые аминокислоты и стоп-кодона выделены жирным шрифтом.

Оказывается, что из океана возможностей природа выбрала алгебраически закономерный вариант повторения и расположения аминокислот и стоп-сигналов в этой матрице 64 триплетов. Показанная на Рис. 1 матрица кодируемых аминокислот и стоп-сигналов состоит из пар соседних строк 0-1, 2-3, 4-5, 6-7, идентичных по составу аминокислот и стоп-кодонам. Например, строки 0 и 1 содержат одинаковый по составу и расположению набор аминокислот Pro, Gln, His, Asn, Lys, Thr. Строки в каждой из указанных пар отличаются тем, что последовательность 6-битных номеров их 16 ячеек образует циклическую последовательность с единичным расстоянием Хэмминга между соседними ячейками, если читать бинарные номера Грея ячеек верхней из двух строк слева направо, а номера ячеек второй строки реверсивно справа налево (для трех соседних строк эта цикличность не выполняется).

Взаимная замена в коде Грея бинарных символов  $0 \leftrightarrow 1$  (операция комплементарности) порождает комплементарную циклическую последовательность со сдвинутой очередностью членов и единичным расстоянием Хэмминга между соседними членами. Повторение этой операции комплементарности к новой последовательности порождает исходный код Грея, ассоциируясь с репликацией нитей в двойной спирали ДНК. Из кодов Грея можно образовывать колонии циклических кодов за счет их конкатенации и других операций для моделирования биологических колоний.

Уже упомянутый Йордан, автор первой статьи по квантовой биологии, утверждал, что упущенные наукой законы жизни являются законами вероятностей квантовой механики [1]. В свете этого автором при исследовании представительного множества геномных ДНК из банка генетических данных GenBank выявлены общие правила статистической (вероятностной) организации информационных последовательностей однонитевых геномных ДНК высших и низших организмов при бинарном представлении этих последовательностей [4-8]. Под бинарным представлением понимается прочтение последовательностей ДНК на основе тех или иных бинарно-оппозиционных молекулярных признаков нуклеотидов в алфавите ДНК. К числу этих признаков относятся молекулярные оппозиции пурины-пиримидины, амино-кето, сильные и слабые водородные связи. Например, при представлении нуклеотидной последовательности однонитевой ДНК первой хромосомы человека, содержащей около 250 миллионов нуклеотидов, в виде бинарной последовательности пуринов (А и G) и пиримидинов (С и Т), принимаемых соответственно за 0 и 1, возникает огромное бинарное число с многомиллионным количеством битов. Так образующиеся числа автор называет бинарно-геномными (БГ-числами). Для анализа статистических особенностей бинарно-геномных чисел использован эффективный авторский метод иерархий бинарных статистик [4-9]. В результате проведенного исследования выявилось, что бинарно-геномные числа составляют особое подмножество всего множества бинарных чисел с аналогичным количеством битов. Его отличительной особенностью является наличие определенных закономерностей иерархического, симметричного, дихотомического и фрактало-подобного типа в статистической организации БГ-чисел.

Данные закономерности коррелируют с особенностями иерархических семейств циклических  $n$ -битных кодов Грея. Это позволяет автору развивать модели генетической информатики и генетического наследования циклических физиологических структур на основе семейств кодов Грея, полагая эти циклические коды ключевыми для понимания и изучения многих взаимно связанных генетических и

биологических структур циклического характера. В частности, получают новое освещение известные данные о пространственной упаковке хромосом в клеточных ядрах на базе кривой Гильберта, сопряженной с кодами Грея. Автор предлагает и обосновывает рассмотрение организмов как циклически кодированных циклических сущностей. Это направление исследований касается развития систем геноморфного искусственного интеллекта и осмысления проблемы биологического времени, давно связываемого с взаимно координированными циклическими процессами в организмах. На этом направлении с опорой на коды Грея удастся также развивать новые модельные алгебро-геометрические подходы к голографическим информационным свойствам живого (нелокальная информатика), генетическим алгоритмам, трехмерному морфогенезу на основе строчных информационных последовательностей ДНК, белковым последовательностям аминокислот, структурным связям генетической информатики с геометрией Лобачевского и ее конформной дисковой моделью Пуанкаре.

**Заключение.** Коды Грея являются основой новых модельных подходов в матричной генетике и алгебраической биологии.

#### Список литературы

1. McFadden, J. and Al-Khalili, J. The origins of quantum biology. // Proceedings of the Royal Society A. 2018. Vol. 474. Issue 2220. P. 1-13.
2. Гурвич А.Г. Избранные Труды. М.: Медицина, 1977. 352 с.
3. Аршинов М.Н., Садовский Л.Е. Коды и математика. М.: Наука, 1983. 142 с.
4. Petoukhov S.V. The principle "like begets like" in algebra-matrix genetics and code biology // Biosystems. 2023. 233. 105019.
5. Petoukhov S.V. The Principle "Like Begets Like" in Molecular and Algebraic-Matrix Genetics // Preprints.org. 2022. 2022110528. URL: <https://doi.org/10.20944/preprints202211.0528.v3> (from 25 May 2023).
6. Petoukhov S.V., He M. Algebraic biology, matrix genetics, and genetic intelligence. Singapore: World Scientific, 2023. 616 p.
7. Petoukhov S.V. Biological dualism stochastics-determinism and its modeling by tensor-unitary transformations // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2023. Vol. 159. P. 316-326.
8. Петухов С.В. Универсали геномных ДНК, генетический интеллект и представление о стохастической системе проторегуляции // Медицина и искусство. 2023. Том 1. №2. С. 40-57.
9. Петухов С.В. Матричная генетика и алгебраическая биология. Пленарный доклад на открытии Всемирного конгресса «Теория систем, алгебраическая биология и искусственный интеллект». Президиум РАН 26-30 июня 2023 г. Url: <https://www.youtube.com/watch?v=VUbeSvAmw1c&t=0s>.

# НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ВИНТОВЫХ КАНАВОК МИКРОФРЕЗ, ИСПОЛЬЗУЯ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Петр Пивкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория Технологий Микрообработки, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

<sup>2</sup> Кафедра Инструментальной Техники и Технологий Формообразования, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия

**Abstract.** Геометрические параметры профиля канавок микрофрез оказывают большое влияние как на надежность и эффективность эксплуатации. В связи с этим высокоточный контроль формы профиля канавки необходим на конечной стадии производства. В современных контрольно-измерительных машинах с ЧПУ реализована бесконтактная методика измерений сочных камер отраженного света, работающих по принципу контрастного автофокуса. Существующие методы распознавания профиля винтовой имеют большие погрешности, связанные с низкой эффективностью метода контрастной фокусировки в случае контроля участка из нескольких подразделов. Предложенный алгоритм распознавания основан на поиске локальных точек фокусировки, полученных в результате анализа изображений с камеры отраженного света. Показано, что данный метод обеспечивает высокую точность контроля профиля канавок микрофрез.

## 1. Введение

За последние десятилетия в электронике, точной механике и часовой промышленности все более широкое распространение получило использование микроразмерных режущих инструментов [1-3]. На долю микрофрез в общем объеме производственных операций приходится до 70% времени обработки [4]. Технологии обработки микрофрез во многом зависят от механизма устранения деформаций и условий резания [5], поскольку режущие кромки фрезы в значительной степени чувствительны к абразивным воздействиям. В то же время фрезы малого диаметра до 1 мм более подвержены существенному изменению геометрии в процессе механической обработки [6]. Случайное изменение формы и геометрии лезвия фрезы существенно затрудняет достижение хороших результатов при обработке малогабаритных изделий [7]. Такие условия обосновывают важность исследований и разработок в области новых методов и средств управления геометрией микроинструмента [8,9].

Для контроля геометрических параметров режущего инструмента широко используются технологии промышленного машинного зрения и контактные методы [10]. Состояние инструмента и его пригодность для производства изделий требуемых свойств можно получить с помощью косвенных методов оценки технического состояния путем индикации сил резания [11], шероховатости для чистовых операций [12,13] и сигналов виброакустической эмиссии [14]. Однако применить эти методы для контроля состояния микроинструмента проблематично, поскольку силы, возникающие даже в случае поломки, минимальны. Сигнал акустической эмиссии имеет нестабильный характер преобразования, а контактные методы с зондом не позволяют

добиться требуемой точности из-за того, что размер винтовой канавки микроинструмента соизмерим с размером кончика зонда. Поэтому единственной воспроизводимой методикой измерений является применение методов фотометрии для распознавания образов путем обработки фокальных зон на изделии и получения точек начального расстояния при известной рабочей зоне измерительной машины. Существуют системы, позволяющие формировать массив изображения и облака точек для создания графических моделей [15]. Извлечение координат профиля из двумерного изображения при известной конфигурации станка может иметь нестабильный поиск фокусной зоны в зависимости от качества, кривизны и размеров измеряемой поверхности [15-19].

Данная работа описывает алгоритм контроля профиля винтовой канавки фрезы в условиях плохой освещенности при повторение фокусной зоны на участке с минимальным изменением кривизны. Разработанный подход направлен на повышение эффективности контроля геометрических параметров режущего инструмента.

## 2 . Результаты. Обсуждение

Разработанный алгоритм на основе набора исходных изображений определяет сфокусированные области на каждом изображении, а затем находит координаты профиля стружкорезной канавки микрофрезы. Принцип работы алгоритма основан на формировании изображений в виде многомерного массива. Размерность массива определяется размером изображений и их количеством. Каждое изображение (рис. 2) фильтруется методом вейвлет-преобразования. Фокальная зона определяется путем усреднения значений яркости, а зоны фиксируются по резким различиям в цветах пикселей (рис. 3).

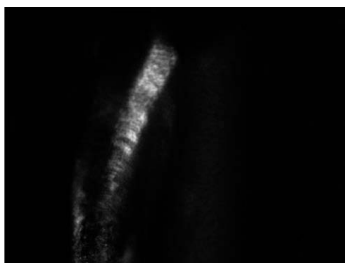


Рис. 1. Наложение изображения-фильтра

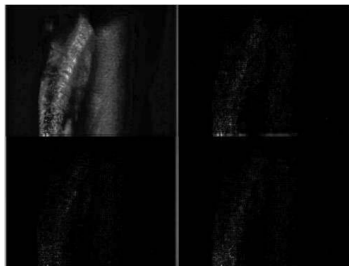


Рис. 1. Фильтрация изображений с помощью вейвлет-преобразования.

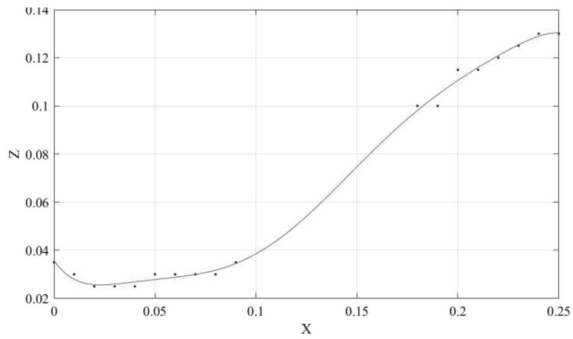


Рис. 2. Профиль винтовой канавки микрофрезы в радиальном сечении измерительной машиной, полученный по предложенному алгоритму

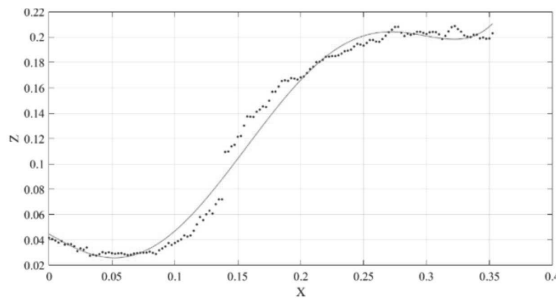


Рис. 3. Профиль винтовой канавки микрофрезы в радиальном сечении измерительной машиной, отсканированный на 3D-сканере на инструментальном микроскопе

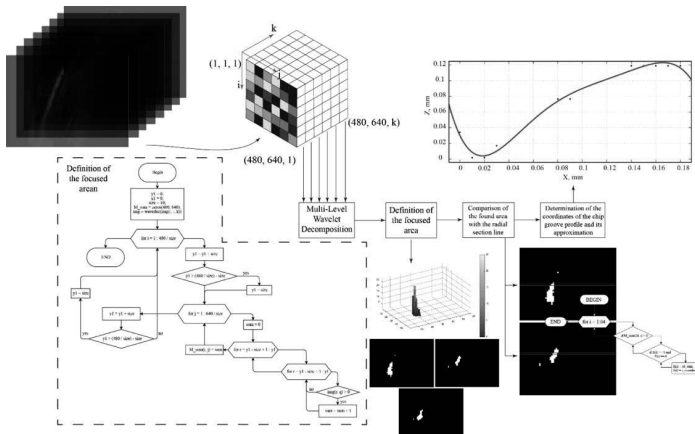


Рис. 4. Алгоритм поиска профиля винтовой канавки микрофрезы

После сравнения всех сфокусированных участков с радиальными сечениями данные координат преобразуются из пикселей в миллиметры, после чего проводится аппроксимация для определения профиля канавки в радиальном сечении (рис. 2).

Для проверки адекватности полученных результатов стружку этой фрезы сканировали с помощью специального инструментального микроскопа, полученные данные представлены на рис. 3. Общая схема алгоритма представлена на рисунке 4.

### 3. Заключение

В данной работе в ходе управления микрорезаком определялась фокальная зона, находились координаты профиля и решалась задача критического поиска фокальной зоны за счет перекрытия фактической фокальной зоны со случайной зоной фокуса и искажение интенсивности пикселей внутри фактического фокуса. В данной работе предложен рациональный подход, исключающий повторные самопересечения фокальных зон и, как следствие, исключается потеря точности. Верификация системы проводилась на основе сравнения поисковых координат профиля винтовой канавки микрофрезы. Показано, что разработанный подход к захвату и анализу изображений позволяет адаптировать сканирование площади к форме контролируемого профиля без потери самопересечения фокальной зоны, что позволяет проводить калибровку измерительной машины на измеренный профиль в автоматизированном режиме.

### 4. Благодарности

Автор проводил исследования на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ "СТАНКИН".

Выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10353 (<https://rscf.ru/project/22-79-10353/>)

### References

1. Thepsonthi, T. and Özel, T., "Experimental and finite element simulation based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Effects of cBN coating on tool wear," *Journal of Materials Processing Technology* 213(4), 532–542 (2013) doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.11.003.
2. Thangamuthu, M., Subramaniam, S., Rajasekar, R., Sakthivel, N.R. and Pramanik, A. "Tool condition monitoring techniques in milling process — a review," *J MatRes and Tech* 9. (2019) doi:10.1016/j.jmrt.2019.10.031.
3. Metel, A., Melnik, Y., Mustafaev, E., Minin, I. and Pivkin, P., "Combined Processing of Micro Cutters Using a Beam of Fast Argon Atoms in Plasma," *Coatings* 11(4), 465 (2021) doi:10.3390/coatings11040465.
4. Pivkin, P. M., Ershov, A. A., Fedorov, S. V., Zhed, O. V., Kuptsov, V. R. and Grechishnikov, V. A., "A new method for determining surface roughness based on the improvement of the kinematics of the milling cutter movement during micro-cutting," *Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence VI*, R. C. Hollins, G. S. Buller, R. A. Lamb, and M. Laurenzis, Eds., 36, SPIE, Online Only, Spain (2021) doi:10.1117/12.2601922
5. Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Minin, I. V., Ershov, A. A., Voronin, V., Nadykto, A. B. and Grigoriev, S. N., "A new approach for controlling of curved cutting edges of toroid-shaped end-milling cutter," *Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical*



- Applications X, S. Zhang, K. G. Harding, and B. Li, Eds., 9, SPIE, Online Only, United States (2021) doi:10.1117/12.2588699.
6. Grigoriev, S.N.; Nadykto, A.B.; Volosova, M.A.; Zelensky, A.A.; Pivkin, P.M. WEDM as a Replacement for Grinding in Machining Ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC Cutting Inserts. *Metals* **2021**, *11*, 882, doi:10.3390/met11060882.
  7. Grigoriev, S.N.; Volosova, M.A.; Okunkova, A.A.; Fedorov, S.V.; Hamdy, K.; Podrabinnik, P.A.; Pivkin, P.M.; Kozochkin, M.P.; Porvatov, A.N. Electrical Discharge Machining of Oxide Nanocomposite: Nanomodification of Surface and Subsurface Layers. *J. Manuf. Mater. Process.* **2020**, *4*, 96, doi:10.3390/jmmp4030096.
  8. Grigoriev, S. N., Pivkin, P. M., Kozochkin, M. P., Volosova, M. A., Okunkova, A. A., Porvatov, A. N., Zelensky, A. A. and Nadykto, A. B., “Physicomechanical Nature of Acoustic Emission Preceding Wire Breakage during Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) of Advanced Cutting Tool Materials,” *Metals* **11**(11), 1865 (2021) doi:10.3390/met11111865.
  9. Arezoo, B., Ridgway, K. and Al-Ahmari, A. M. A., “Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system,” *Computers in Industry* **42**(1), 43–58 (2000) doi:10.1016/S0166-3615(99)00051-2.
  10. Разработка цельных концевых фрез из режущей керамики для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов / С. Н. Григорьев, В. А. Гречишников, М. А. Волосова [и др.] // Вестник МГТУ "Станкин". – 2018. – № 4(47). – С. 87-93.
  11. Vajpai, V., Kushwaha, A. K. and Singh, R. K., “Burr Formation and Surface Quality in High Speed Micromilling of Titanium Alloy (Ti6Al4V),” Volume 2: Systems; Micro and Nano Technologies; Sustainable Manufacturing, V002T03A017, American Society of Mechanical Engineers, Madison, Wisconsin, USA (2013) doi:10.1115/MSEC2013-1216.
  12. Trochoidal slot milling / V. A. Grechishnikov, Y. E. Petukhov, P. M. Pivkin [et al.] // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37, No. 9. – P. 821-823. – DOI 10.3103/S1068798X17090106.
  13. Design of Toroid-Shaped Solid Ceramic End Mill / V. Grechishnikov, S. Grigoriev, P. Pivkin [et al.] // *EPJ Web of Conferences : Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2019)*, Moscow, 15–17 октября 2019 года. – EDPsciences: EDPsciences, 2019. – P. 05001. – DOI 10.1051/epjconf/201922405001.
  14. Пивкин, П. М. Технология изготовления цельной конструкции реза для обработки торцевых канавок сложной формы / П. М. Пивкин // Вестник МГТУ "Станкин". – 2016. – № 4(39). – С. 40-46.
  15. Investigation of Technological Parameters for Machining Toroidal Section of Solid Ceramic End Mills / S. N. Grigoriev, V. A. Grechishnikov, M. A. Volosova [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2020. – P. 022065. – DOI 10.1088/1757-899X/971/2/022065.
  16. A new method for modeling edges of a toroidal cutting surface of solid ceramic end mills / P. M. Pivkin, M. A. Volosova, I. V. Minin [et al.] // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 3, Virtual, Online*, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 115401G. – DOI 10.1117/12.2574391.
  17. Gribkov, A. A. State Industrial Policy and the Machine-Tool Industry / A. A. Gribkov, P. M. Pivkin, A. A. Zelenskii // *Russian Engineering Research*. – 2021. – Vol. 41, No. 4. – P. 342-346. – DOI 10.3103/S1068798X21040092.
  18. Image Processing of Advance Milling Cutters to Automate the Measurement of the Geometric Parameters of the Cutting Edge on Optical Measuring Systems / P. M. Pivkin, I. V. Minin, M. A. Volosova [et al.] // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Tokyo, Japan, 15–19 ноября 2021 года. Vol. 11914. – Tokyo, Japan:

- The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2021. – P. 1191412. – DOI 10.1117/12.2605754. – EDN FRAQBM.
19. A new method for the precise determination of rational geometric parameters of the helical groove and cutting part of high-performance tri-flute / P. M. Pivkin, A. A. Ershov, V. A. Grechishnikov, A. B. Nadykto // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 3, Virtual, Online, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 1154014. – DOI 10.1117/12.2574392. – EDN WMYBBZ.

# НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ ВИНТОВЫХ КАНАВОК МИКРОФРЕЗ, ОСНОВАННЫЙ НА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ

*Петр Пивкин<sup>1,2</sup>, Владимир Гречшников<sup>1,2</sup>, Антон Язев<sup>1,2</sup>, Артём Ершов<sup>1,2</sup>,  
Ольга Надыкто<sup>1,3</sup>, Людмила Уварова<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>Лаборатория Технологий Микрообработки, Московский Государственный  
Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

<sup>2</sup>Кафедра Инструментальной Техники и Технологий Формообразования, Московский  
Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия

<sup>3</sup>Кафедра Прикладной Математики, Московский Государственный Технологический  
Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия

**Abstract.** Ключевую функциональную роль выполняют винтовые поверхности твердосплавных концевых фрез, которые можно изготавливать на алмазном шлифовальном круге. Локальные изменения формы винтовой поверхности могут быть вызваны истиранием, высоким давлением, износом шлифовального круга. Поэтому крайне важно проводить измерения физических образцов изделий с винтовой поверхностью по критерию точности профиля, переднего угла и диаметра стержня. С целью создания рекомендаций по анализу изображений с использованием различных уровней изображения предложенный подход обеспечивает логическое сглаживание гистограмм и ограничение контраста в качестве предварительной обработки изображения на основе анализа изображений с полезными и дефектными частями. Достигнуто успешное выделение областей адгезии, диффузии, истирания и сколов из изображения посредством постобработки. В статье представлен новый подход к распознаванию адгезионных и диффузионных дефектов на винтовой поверхности мельницы после шлифования. При разработке данного подхода выявлено, что области с попеременным изменением профиля наиболее подвержены образованию дефектов в условиях повышенного нагрева рабочей зоны, а специализированные индукторы для поиска дефектов на локализованных участках по критерию интенсивности яркости.

## 1. Введение

Процессы поиска решений являются наиболее популярными и успешно реализуемыми в автоматизированном производстве. Визуальное управление с помощью компьютерного зрения имеет большой потенциал для создания единой цифровой промышленности в различных сферах: металлургии, автомобилестроении, машиностроении, станкостроении [1-7]. Обнаружение дефектов поверхности на начальных этапах производства позволяет снизить затраты и сэкономить время при производстве [8-12].

Шлифование винтовой поверхности на конических и круглоконцевых фрезах является важной и завершающей операцией при изготовлении режущего инструмента [13-16]. Исследуемая винтовая канавка имеет свои характерные особенности.

Поверхности инструмента можно обрабатывать разными методами. Наиболее распространенным методом является шлифование [17,18], но иногда применяют методы электроэрозионной обработки [19,20], лазерной абляции [21], травления [22] и др. Покрытия на рабочей поверхности также усложняют процесс обнаружения дефектной зоны, модифицируемой поверхностью режущего инструмента [23-28]. При рассмотрении методов плазменного и лучевого осаждения покрытий [23] рассматриваются наноразмерные многослойные покрытия керамических режущих инструментов [24-28]. Читатели этой работы должны быть знакомы с достижениями в области понимания эффективности межсетевых соединений, точности и обработки изображений, а также современных технологий. В результате шлифовки поверхности может возникнуть ряд дефектов. Образование трещин, адгезионное и диффузионное налипание материала шлифовального круга на обрабатываемый материал [29]. Диффузия – проникновение одного материала в другой усиливается при высоких температурах и при высоком давлении на абразивные кромки обрабатываемого материала [30]. Поэтому часть абразива и связок переносится на обработанную винтовую поверхность концевой фрезы. Процедуры контроля для выявления таких дефектов обычно проводятся с использованием методов неразрушающего контроля [31]. Таким образом, результаты применения и результаты компьютерных методов наблюдения за неразрушающим контролем образования дефектов на поверхности рабочих поверхностей с концентраторами давления представляют собой важную и передовую научно-техническую группу. Для поиска дефектов пластов наибольшее распространение получили системы компьютерного зрения.

Классические подходы к использованию компьютерного зрения предполагают ручное создание функций и трендов для определения механизмов образования дефектов на основе различных критериев: цвета, контраста, текстуры, краев, статистики переднего и заднего планов [32-37] и т. д. Также широко распространен подход к обнаружению дефектов на поверхности различной формы — это применение машинного обучения (машины опорных векторов, дерево решений или K-ближайшие соседи). Поэтому проектирование систем управления промышленными объектами базируется на тщательном обосновании причин и тенденций определения дефектной зоны; такие методы во многом зависят от ручного извлечения признаков обнаружения дефектов. Это существенно усложняет сложность решаемой задачи. Однако использование этого класса методов позволяет исключить обработку многих расчетных и геометрических решений в числовой форме, а также интегрирует уже проверенную функцию при реализации работы алгоритмов.

Существует три основных класса задач распознавания изображений: классификация, сегментация и обнаружение объектов. Задача классификации дефектов направлена на отнесение изображения к определенной категории или типу, что требует, помимо разработки показателей обнаружения дефектов, дополнительной градации по интенсивности для проведения классификации [38]. Формирование краев объекта или области активно совершенствовалось в ходе развития компьютерного зрения. Локализация объекта или обнаруженной зоны использовалась в работах [39-41]. Для определения ограниченных зон на криволинейной винтовой поверхности режущего инструмента оправдано использование методов сегментации, позволяющих попиксельно формировать область поиска дефектов. Для решения задач сегментации широко используются сверточные сети, подходы на основе кодера-декодера [42], многомасштабные и пирамидальные архитектуры [43] и т.д.

Автоматическое измерение винтовых канавок концевых фрез с помощью компьютерного зрения с помощью оптической машины является актуальной исследовательской задачей. Важнейшие методы измерения изображения при решении инженерных задач делятся на определение фокальных зон и изучаются методами обработки изображений, такими как алгоритмы бинаризации и обнаружения границ [44-46], кластеризация изображений [47-50] или вышеупомянутые методы выращивания регионов для сегментации [51, 52].

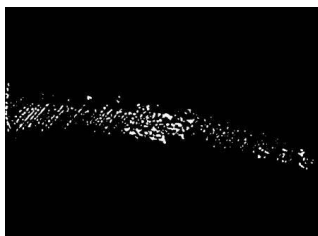
Формируются определение и выявление областей поиска в исследованиях, проводимых по критериям освещения и яркости (например, в рамках того же исследования [53] по сравнению с [54]). Это связано с разными типами внешних изображений (степенью размытости купола [55-58]), ограниченностью размера и качества тестовых данных, точностью определения переднего угла, диаметра сердечника, формы передней поверхности [59] и т.д. В связи с этим определение дефектов на винтовой поверхности может коррелировать на макромасштабе и характеризовать конкретные условия поиска зон и областей с точки зрения адгезионного и диффузионного взаимодействия. Подобные особенности процесса шлифования в настоящее время мало изучены из-за высокой сложности и сложности выявления взаимосвязанных характеристик, давления на обрабатываемую поверхность, температуры, абразивного взаимодействия, что представляет собой важнейшую комплексную и междисциплинарную проблему.

В результате анализа литературы установлено, что распознавание дефектов винтовой поверхности с помощью компьютерного зрения является актуальной задачей для повышения качества, снижения затрат и сокращения времени производственного цикла шлифования винтовых поверхностей на изделиях. Цель данной статьи – выявить внутренние закономерности процесса обработки изображений винтовых канавок для определения количества и зон распространения дефектов. Разработанный подход позволит улучшить понимание процесса шлифования винтовой поверхности и установить характер контакта шлифовального круга с винтовой канавкой. Поэтому в работе предлагается гипотеза о возможности использования системы компьютерного моделирования для решения прикладных задач устранения дефектов на режущем инструменте. В работе также выдвинута гипотеза о том, что участки с переменным изменением профиля наиболее динамично формируют дефекты в условиях повышенного нагрева рабочей зоны. В данной работе рассмотрена природа образования дефектов на винтовой поверхности на макроуровне и установлены новые показатели порогового определения уровня яркости и контрастности изображения в сегментированной фокальной зоне при формировании дефекта.

## **2. Методология**

Известны механизмы сегментации изображения при поиске различных зон на изображении. Однако полное сканирование участков винтовых канавок режущего инструмента занимает много времени. Поэтому на первом этапе разработки подхода к поиску дефектов мы рассмотрим механизмы определения фокальных зон на изображении и установим природу образования дефектов на макроуровне. В этом случае винтовая поверхность имеет ряд участков с чередующимся направлением ординат набора точек профиля. В связи с этим для решения задачи обработки изображений, распознавания фокальных зон и воссоздания передней винтовой

поверхности инструмента в работе используются методы обработки изображений, основы построения алгоритмов, прикладное применение методов эрозии изображений, теория проектирование и производство режущего инструмента. Механизм сканирования винтовой поверхности заключается в последовательном формировании набора изображений, на каждом из которых алгоритм устанавливает фокальную зону и сравнивает ее с контрольной формой винтовой канавки контактным методом с зондом. Зону поиска анализируют на наличие наиболее развитых форм дефектов участка и дополнительно проверяют пороговый уровень яркости и контрастности изображения в сегментированной фокальной зоне. Эти показатели экономического коэффициента устанавливаются на примере. Граница зоны фокусировки изображения определяется исходя из следующего признака. Более четкое отображение винтовой поверхности обусловлено более высокой четкостью пикселей и уменьшенным диапазоном изменения интенсивности цвета. Выбор границы фокальной области на изображении сводится к замене значения в каждом пикселе изображения средневзвешенным значением, включая значение окружающих пикселей, тем самым сглаживая изображение. Определяем значение размытия исходного изображения и загружаем сравнительные результаты. Установлено, что характеристики изображения вне фокальной области не имеют значения при сглаживающих изменениях. Отсюда следует, что для определения фокусной площади матрицы исходного изображения необходимо изменить матрицу изображения после сглаживания. Значения в прежней области размытия приводятся к значениям приближенным образом, а в зоне фокусировки из-за разницы в пикселях сглаженного изображения и исходного изображения уменьшаются до значений от 150 до 255. После чего проводится бинаризация для формирования контрастных областей фокуса (рис. 1).

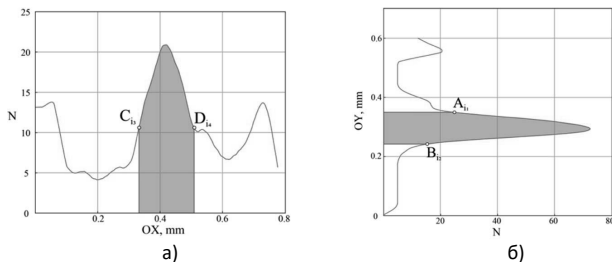


**Рис. 1.** Бинаризованное изображение, полученное в результате разницы между матрицей исходного изображения и изображения после сглаживания.



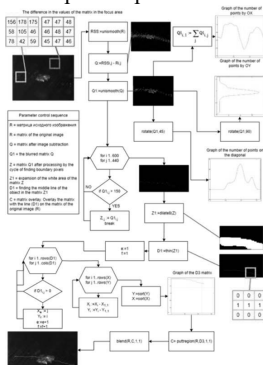
**Рис. 2.** Совокупности точек, лежащих в середине области в фокусной плоскости, наложенные на исходное изображение.

Для распознавания реальных координат дефектной зоны устанавливают ограничения по критерию повышения резкости. Изображение представляет собой ярко выраженный фокус, в котором применяется алгоритм, считывающий количество световых точек в каждой строке и записывающий его в отдельную матрицу. Значения в новой матрице координат расположены по оси OY, что отображает график интенсивности цвета, показанный на рисунке 3.



**Рис. 3.** Зависимость количества светлых точек по осям OX (а) и OY (б) в осевом сечении конической фрезы.

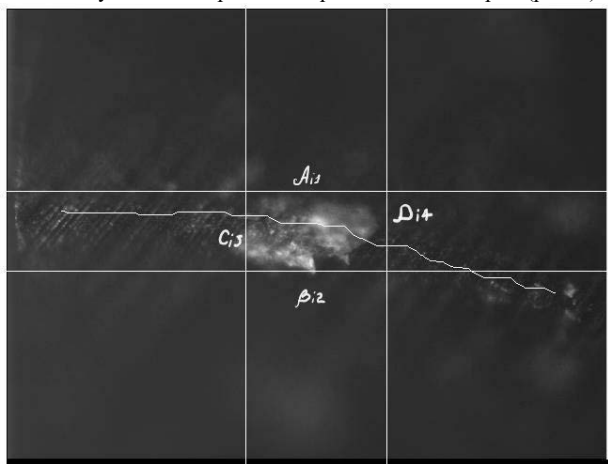
Комплексный алгоритм и основные параметры измерения дефектов винтовых канавок с использованием компьютерного зрения показаны на рисунке 4.



**Рис. 4.** Комплексный алгоритм и основные параметры измерения дефектов винтовой канавки с помощью компьютерного зрения.

Изучив характер изменений в зависимости от погрешности теоретического профиля по координатам OX в осевом сечении, можно заметить, что погрешность профиля изменяется симметрично относительно центра дефекта клеевого соединения на поверхности канавки. Это могло быть связано с различными факторами, например, с тем, что профиль канавки имеет знакопеременную смену знака и образует зону с наибольшим давлением при обработке, или с обеспечением распространения света по винтовой канавке с переменным знаком значения координатный профиль по оси OY. Поэтому можно предположить, что наибольшие изменения дефектов вызывают участки с чередующимися модификациями профиля в условиях повышенного нагрева рабочей зоны. Это так, включен алгоритм алгоритма, который включает в расчетный модуль

результаты изменения выходного результата линии, ограничивающей зону дефектного слоя, что свидетельствует о подтверждении предложенной теории (рис. 5).



**Рис. 5.** Координаты ограничивают границы дефектной зоны в нормальной форме относительно осевой винтовой канавки фрезы.

В результате работы был предложен новый подход к решению задачи определения дефектных зон адгезии и диффузии с использованием новых показателей интенсивности света в локализованной области, определяемой путем сегментации изображения.

### 3. Заключение

В статье представлен новый подход к распознаванию адгезионных и диффузионных дефектов на винтовой поверхности концевых фрез. Выявлено, что участки со знакопеременным изменением профиля наиболее подвержены дефектообразованию в условиях повышенного нагрева концевой фрезы. В рамках подхода предложены специализированные индукторы для поиска дефектов в локализованных областях по критерию интенсивности яркости пикселей. В результате однозначно определялась зона адгезионных и диффузионных дефектов на винтовой поверхности мельницы. Предложенный подход к контролю винтовых канавок после шлифования позволяет снизить трудоемкость измерений, упростить измерения и повысить точность. Дальнейшее развитие предлагаемого соединителя может включать в себя механизмы смещения зоны поиска дефекта по всей длине винтовой канавки.

### 4. Благодарности

Авторы проводили исследования на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ "СТАНКИН".

Выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00986 (<https://rscf.ru/project/23-29-00986/>)



## References

1. Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Ershov, A. A., Minin, I. V., Zelensky, A. A. and Nadykto, A., “Optical image inspection of helical surface geometry of drill,” presented at Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications IX, 30 May 2022, Orlando, United States, 24, Proc. SPIE doi:10.1117/12.2622991.
2. Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X. and Wu, D., “Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications,” *J Manuf Syst* **48**, 144–156 (2018) doi:10.1016/j.jmsy.2018.01.003.
3. Arco, J. E., Ortiz, A., Ramírez, J., Martínez-Murcia, F. J., Zhang, Y.-D. and Góriz, J. M., “Uncertainty-driven ensembles of multi-scale deep architectures for image classification,” *Inf Fusion* **89**, 53–65 (2023) doi:10.1016/j.inffus.2022.08.010.
4. Oliveira, S. R. M., Alves, J. L. and Boer, H., “Innovation in the Product Development Process and Performance of firm: An Experience of Value co-creation Based on Incorporation of Technological Innovations by the 3D Modeling and Additive Manufacturing,” *Proc. CIRP* **62**, 452–457 (2017) doi:10.1016/j.procir.2016.06.090.
5. Концепция построения робототехнических комплексов для металлообработки и системы их инструментального обеспечения / В. А. Гречишников, А. В. Исаев, Ю. В. Илюхин [и др.] // Вестник МГТУ “Станкин”. – 2015. – № 4(35). – С. 46-51.
6. Park, M. and Jeong, J., “Design and Implementation of Machine Vision-Based Quality Inspection System in Mask Manufacturing Process,” *Sustainability* **14**(10), 6009 (2022) doi:10.3390/su14106009.
7. Abagiu, M. M., Cojocaru, D., Manta, F. and Mariniuc, A., “Detecting Machining Defects inside Engine Piston Chamber with Computer Vision and Machine Learning,” *Sensors* **23**(2), 785 (2023) doi:10.3390/s23020785.
8. Ren, Z., Fang, F., Yan, N. and Wu, Y., “State of the Art in Defect Detection Based on Machine Vision,” *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* **9**(2), 661–691 (2022) doi:10.1007/s40684-021-00343-6.
9. Wang, Q., Liu, Q., Xia, R., Li, G., Gao, J., Zhou, H. and Zhao, B., “Defect Depth Determination in Laser Infrared Thermography Based on LSTM-RNN,” *IEEE Access* **8**, 153385–153393 (2020) doi:10.1109/ACCESS.2020.3018116.
10. Electrical discharge machining of oxide nanocomposite: Nanomodification of surface and subsurface layers / S. N. Grigoriev, M. A. Volosova, A. A. Okunkova [et al.] // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2020. – Vol. 4, No. 3. – P. 96. – DOI 10.3390/JMMP4030096.
11. Kim, M., Lee, M., An, M. and Lee, H., “Effective automatic defect classification process based on CNN with stacking ensemble model for TFT-LCD panel,” *J Intell Manuf* **31**(5), 1165–1174 (2020) doi:10.1007/s10845-019- 01502-y.
12. Tabernik, D., Šela, S., Skvarč, J. and Skočaj, D., “Segmentation-based deep-learning approach for surface-defect detection,” *J Intell Manuf* **31**(3), 759–776 (2020) doi:10.1007/s10845-019-01476-x.
13. Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Ershov, A. A. and Nadykto, A. B., “A new method for the precise determination of rational geometric parameters of the helical groove and cutting part of high-performance tri-flute,” *Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence V*; and *Advanced Manufacturing Technologies for Micro- and Nanosystems in Security and Defence III*, Proc. SPIE, Online Only, United Kingdom (2020) doi:10.1117/12.2574392.
14. Grigoriev, S. N., Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Petukhov, Y. E., Volosova, M. A. and Nadykto, A. B., “High- precision method for determining the optimal trajectory of movement of a conical grinding wheel relative to the helical grooves of solid ceramic mills,” presented at *Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence*

- V; Advanced Manufacturing Technologies for Micro- and Nanosystems in Security and Defence III, 20 September 2020, Online Only, United Kingdom, Proc. SPIE 115401 doi:10.1117/12.2574389.
15. Liu, X., Chen, Z., Ji, W. and Wang, L., "Iteration-based error compensation for a worn grinding wheel in solid cutting tool flute grinding," *Procedia Manuf* **34**, 161–167 (2019) doi:10.1016/j.promfg.2019.06.134.
  16. Ren, L., Xu, J., Zhang, X., Cui, X. and Ma, J., "Determination of wheel position in flute grinding of cylindrical end-mills considering tolerances of flute parameters," *J Manuf Process* **74**, 63–74 (2022) doi:10.1016/j.jmappro.2021.11.065.
  17. Huan, H., Pu, J., Ding, W., Zhao, B., Xu, W., Zhu, C. and Zhang, K., "Influence of elliptical particle inclination on the formation mechanism of surface defects in turning PTMCs," *Int J Adv Manuf Technol* **126**(11–12), 5475–5485 (2023) doi:10.1007/s00170-023-11470-6.
  18. Pivkin, P. M., Kozochkin, M. P., Minin, I. V., Allenov, D. G., Kopylov, V. V., Nadykto, A. B. and Grigoriev, S. N., "A new method for monitoring grinding processes using accelerometers," presented at Signal Processing, Proc. of SPIE Vol. 12767 127671T-9 Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXXI, 8 June 2022, Orlando, United States, Proc. SPIE doi:10.1117/12.2622919.
  19. Grigoriev, S. N., Volosova, M. A., Okunkova, A. A., Fedorov, S. V., Hamdy, K., Podrabinnik, P. A., Pivkin, P. M., Kozochkin, M. P. and Porvatov, A. N., "Electrical Discharge Machining of Oxide Nanocomposite: Nanomodification of Surface and Subsurface Layers," *JMMP* **4**(3), 96 (2020) doi:10.3390/jmmp4030096.
  20. [20] Grigoriev, S. N., Nadykto, A. B., Volosova, M. A., Zelensky, A. A. and Pivkin, P. M., "WEDM as a Replacement for Grinding in Machining Ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC Cutting Inserts," *Metals* **11**(6), 882 (2021) doi:10.3390/met11060882.
  21. Zaidi, Z., Fathipour, V., Jia, X. and Chang-Hasnain, C., "Wavelength-Demultiplexed Laser Interferometry for Metrology," *IEEE Photonics J.* **13**(1), 1–9 (2021) doi:10.1109/JPHOT.2020.3044969.
  22. Grigoriev, S. N., Melnik, Yu. A., Metel, A. S. and Panin, V. V., "Broad beam source of fast atoms produced as a result of charge exchange collisions of ions accelerated between two plasmas," *Instrum Exp Tech* **52**(4), 602–608 (2009) doi:10.1134/S002044120904023X.
  23. Design of Toroid-Shaped Solid Ceramic End Mill / V. Grechishnikov, S. Grigoriev, P. Pivkin [et al.] // EPJ Web of Conferences : Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2019), Moscow, 15–17 октября 2019 года. – EDPsciences: EDPsciences, 2019. – P. 05001. – DOI 10.1051/epjconf/201922405001.
  24. Пивкин, П. М. Технология изготовления цельной конструкции реза для обработки торцевых канавок сложной формы / П. М. Пивкин // Вестник МГТУ "Станкин". – 2016. – № 4(39). – С. 40-46.
  25. Investigation of Technological Parameters for Machining Toroidal Section of Solid Ceramic End Mills / S. N. Grigoriev, V. A. Grechishnikov, M. A. Volosova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2020. – P. 022065. – DOI 10.1088/1757-899X/971/2/022065. – EDN NZIWEN.
  26. Выбор шага смещения формообразующего контура при трохoidalном фрезеровании паза концевыми фрезами / В. А. Гречишников, Ю. Е. Петухов, П. М. Пивкин [и др.] // СТИН. – 2017. – № 4. – С. 21-23. – EDN YKVCZR.
  27. [A new method for modeling edges of a toroidal cutting surface of solid ceramic end mills / P. M. Pivkin, M. A. Volosova, I. V. Minin [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 3, Virtual, Online, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 115401G. – DOI 10.1117/12.2574391.

28. High-precision method for determining the optimal trajectory of movement of a conical grinding wheel relative to the helical groove of solid ceramic mills / S. N. Grigoriev, P. M. Pivkin, M. A. Volosova [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 3, Virtual, Online, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 115401E. – DOI 10.1117/12.2574389.
29. Kuang, W., Miao, Q., Ding, W. and Li, H., “A short review on the influence of mechanical machining on tribological and wear behavior of components,” *Int J Adv Manuf Technol* **120**(3–4), 1401–1413 (2022) doi:10.1007/s00170-022-08895-w.
30. Liu, P., Quan, Y., Wan, J. and Yu, L., “Experimental Investigation on the Wear and Damage Behaviors of Machined Wheel-Rail Materials under Dry Sliding Conditions,” *Materials* **14**(3), 540 (2021) doi:10.3390/ma14030540.
31. Sharma, M., Lim, J. and Lee, H., “The Amalgamation of the Object Detection and Semantic Segmentation for Steel Surface Defect Detection,” *Applied Sciences* **12**(12), 6004 (2022) doi:10.3390/app12126004.
32. Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Ershov, A. A., Volosova, M. A. and Nadykto, A. B., “Reverse engineering of geometric models of advanced curved edge drills using optical measuring systems,” presented at Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V, 12 September 2021, Online Only, Spain, 25, Proc. SPIE doi:10.1117/12.2602170.
33. Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Ershov, A. A. and Grigoriev, S. N., “A new method definition of cutting surface of drills by image processing flank surface,” *SPIE Future Sensing Technologies 2021*, 56, Proc. SPIE, Online Only, Japan (2021) doi:10.1117/12.2605834.
34. Han, B.-G., Lee, J. T., Lim, K.-T. and Choi, D.-H., “License Plate Image Generation using Generative Adversarial Networks for End-To-End License Plate Character Recognition from a Small Set of Real Images,” *Appl. Sci.* **10**(8), 2780 (2020) doi:10.3390/app10082780.
35. Hsu, G.-S., Chen, J.-C. and Chung, Y.-Z., “Application-Oriented License Plate Recognition,” *IEEE Trans. Veh. Technol.* **62**(2), 552–561 (2013) doi:10.1109/TVT.2012.2226218.
36. Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Minin, I. V., Ershov, A. A., Voronin, V., Nadykto, A. B. and Grigoriev, S. N., “A new approach for controlling of curved cutting edges of toroid-shaped end-milling cutter,” presented at Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications X, 12 April 2021, Online Only, United States, Proc. SPIE doi:10.1117/12.2588699. Proc. of SPIE Vol. 12767 127671T-10
37. Capar, A. and Gokmen, M., “Concurrent Segmentation and Recognition with Shape-Driven Fast Marching Methods,” presented at 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR’06), 2006, Hong Kong, China, 155–158, IEEE doi:10.1109/ICPR.2006.400.
38. Cremers, D., Tischhäuser, F., Weickert, J. and Schnörr C., “Diffusion Snakes: Introducing Statistical Shape Knowledge into the Mumford-Shah Functional,” *International Journal of Computer Vision* **50**, 295–313 (2002) doi:10.1023/A:1020826424915.
39. He, K., Gkioxari, G., Dollár, P. and Girshick, R., “Mask R-CNN,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **42**(2), 386–397 (2020) doi:10.1109/TPAMI.2018.2844175.
40. Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y. and Berg, A. C., “SSD: Single Shot MultiBox Detector,” *Computer Vision – ECCV 2016* **9905**, B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, and M. Welling, Eds., 21–37, Springer International Publishing, Cham (2016) doi:10.1007/978-3-319-46448-0\_2.

41. Gribkov, A. A. State Industrial Policy and the Machine-Tool Industry / A. A. Gribkov, P. M. Pivkin, A. A. Zelenskii // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, No. 4. – P. 342–346. – DOI 10.3103/S1068798X21040092.
42. Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T., “U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation,” presented at Computer Vision and Pattern Recognition, 2015, arXiv doi:10.48550/ARXIV.1505.04597.
43. Seferbekov, S., Igllovikov, V., Buslaev, A. and Shvets, A., “Feature Pyramid Network for Multi-class Land Segmentation,” 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 272–2723, IEEE, Salt Lake City, UT, USA (2018) doi:10.1109/CVPRW.2018.00051.
44. Fadli, V. F. and Herlistiono, I. O., “Steel Surface Defect Detection using Deep Learning,” IJISRT **5**(7), 244–250 (2020) doi:10.38124/IJISRT20JUL240.
45. Liu, Y., Geng, J., Su, Z., Zhang, W. and Li, J., “Real-Time Classification of Steel Strip Surface Defects Based on Deep CNNs,” [Proceedings of 2018 Chinese Intelligent Systems Conference], Y. Jia, J. Du, and W. Zhang, Eds., Springer Singapore, Singapore, 257–266 (2019).
46. Tulbure Andrei-Alexandru and Dulf, E. H., “Low Cost Defect Detection Using a Deep Convolutional Neural Network,” presented at In Proceedings of the IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), 2020, Romania, Unpublished doi:10.13140/RG.2.2.33662.95048.
47. Pivkin, P. M., Minin, I. V., Volosova, M. A., Romanov, V. B. and Nadykto, A. B., “Image processing of advance milling cutters to automate the measurement of the geometric parameters of the cutting edge on optical measuring systems,” SPIE Future Sensing Technologies 2021, 53, Proc. SPIE, Online Only, Japan (2021) doi:10.1117/12.2605754.
48. Simonyan, K. and Zisserman, A., “Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition,” presented at In Proceedings of the International Conference of Learning Representations (ICLR), 2014, San Diego, CA, USA, arXiv doi:10.48550/ARXIV.1409.1556.
49. Grigoriev, S. N., Pivkin, P. M., Kozochkin, M. P., Volosova, M. A., Okunkova, A. A., Porvatov, A. N., Zelensky, A. A. and Nadykto, A. B., “Physicomechanical Nature of Acoustic Emission Preceding Wire Breakage during Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) of Advanced Cutting Tool Materials,” Metals **11**(11), 1865 (2021) doi:10.3390/met11111865.
50. He, Y., Song, K., Meng, Q. and Yan, Y., “An End-to-End Steel Surface Defect Detection Approach via Fusing Multiple Hierarchical Features,” IEEE Trans. Instrum. Meas. **69**(4), 1493–1504 (2020) doi:10.1109/TIM.2019.2915404.
51. He, K., Zhang, X., Ren, S. and Sun, J., “Deep Residual Learning for Image Recognition,” 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 770–778, IEEE, Las Vegas, NV, USA (2016) doi:10.1109/CVPR.2016.90.
52. A Review of Analytical and Numerical Modeling of the Multi-axis Grinding of Helical Surfaces / V. A. Grechishnikov, Y. E. Petukhov, P. M. Pivkin [et al.] // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 3. – P. 359–363. – DOI 10.3103/S1068798X23040147.
53. Zhang, Y., Guo, X., Ma, J., Liu, W. and Zhang, J., “Beyond Brightening Low-light Images,” Int J Comput Vis **129**(4), 1013–1037 (2021) doi:10.1007/s11263-020-01407-x.
54. Zhang, J., Chen, X., Tang, W., Yu, H., Bai, L. and Han, J., “Single image relighting based on illumination field reconstruction,” Opt. Express **31**(18), 29676 (2023) doi:10.1364/OE.495858.

55. Flusser, J., Lébl, M., Šroubek, F., Pedone, M. and Kostková, J., “Blur Invariants for Image Recognition,” *Int J Comput Vis* **131**(9), 2298–2315 (2023) doi:10.1007/s11263-023-01798-7. Proc. of SPIE Vol. 12767 127671T-11
56. Pivkin, P. M., Ershov, A. A. and Nadykto, A. B., “New image processing algorithm to recognition of the profile of micro-mills,” presented at Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications IX, 19 December 2022, Online Only, China, 77, Proc. SPIE doi:10.1117/12.2646538.
57. Khodadadi, R., Ardeshir, G. and Grailu, H., “Variable bit allocation method based on meta-heuristic algorithms for facial image compression,” *Multimed Syst* (2023) doi:10.1007/s00530-023-01163-1.
58. Phillips, P. J., Hyeonjoon Moon, Rizvi, S. A. and Rauss, P. J., “The FERET evaluation methodology for face- recognition algorithms,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* **22**(10), 1090–1104 (2000) doi:10.1109/34.879790.
59. Pivkin, P. M., “Computer-aided design system based on spline interpolation of micromills for high-speed processing of products manufactured by laser ablation and grinding,” *Advanced Laser Processing and Manufacturing VI*, Y. Sano, M. Hong, R. Xiao, and J. Yao, Eds., Proc. SPIE, Online Only, China (2022) doi:10.1117/12.2646531.
60. Zeng, T., Chen, Z. C., Liu, Z., Yi, Z. and Wang, S., “An applied explicit mathematical model of conical drill point geometry without flank rubbing,” *Int J Adv Manuf Technol* **106**(9–10), 3707–3720 (2020) doi:10.1007/s00170- 019-04759-y.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖУЩИХ КРОМОК НА ПРОИЗВОДЯЩЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Петр Пивкин<sup>1,2</sup>, Антон Язев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория Технологий Микрообработки, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

<sup>2</sup> Кафедра Инструментальной Техники и Технологий Формообразования, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

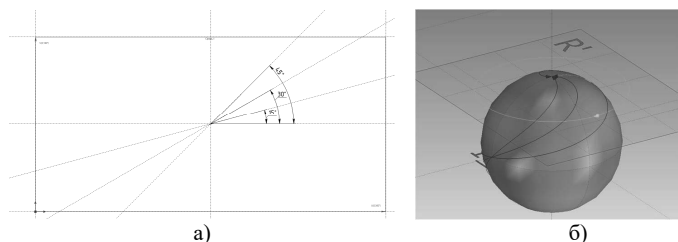
**Abstract.** Сферические производящие поверхности резания широко распространены в конструкциях режущих инструментов. Режущие кромки на сферическом торце определяются формой винтовых канавок фрез и формой подточек. Однако, контроль геометрии и стандарты для оценки геометрических параметров кромок в широком виде не изучены. Поэтому в данной работе предложена модель оценки углов наклона режущих кромок и их связь с разверткой сферической поверхности, определяющей механизм стружкообразования в процессе резания торцом фрезы. В результате исследования режущих кромок установлено, что характеристики кромок на развертке сферы напрямую определяют геометрические параметры кромок в инструментальной системе координат.

Эксплуатация сферических фрез имеет широкое распространение в авиационной, автомобильной промышленности. Режущая способность инструмента при обработке деталей сложной формы, таких как материал инструмента [1-5], режимы эксплуатации [6-10] и рациональный выбор геометрии режущего инструмента [10-13]. Кроме того, геометрия инструмента существенно влияет на эффективность процесса резания и требует постоянного совершенствования. Параметры геометрии инструмента, влияющие на производительность резания шаровой концевой фрезы, — это передний угол, задний угол, угол спирали, радиус вершины, диаметр внутренней окружности и радиус режущей кромки [14]. Каждый фактор оказывает свое определяющее влияние на эффективность работы инструмента, и, следовательно, его значение выбирается на основе свойств обрабатываемого материала, условий обработки, требуемой чистоты поверхности и т. д.

Геометрия режущих кромок инструмента является крайне важным параметром для эффективной эксплуатации сферических фрез. Назначение и контроль геометрии режущих кромок является актуальной задачей. Существует ряд подходов совершенствования конструкций режущих кромок инструментов [15-17]. Однако, классических подходов для преобразования и расчета геометрических параметров из развертки производящей поверхности и параметров кромок на основных видах инструментальной системе координат не существует. В данной работе предложена модель исследования изменения геометрических параметров фрез со сферическим торцом.

В поставленной задаче необходимо найти как изменяется угол наклона в цилиндрической системе координат, линии построенной в развертки сферы. Развертка сферы представляет собой прямоугольную систему координат с ограничением по оси X в 180 градусов, а по оси Y 90 градусов, оси обозначены как U и V соответственно. Начало системы координат находится в центре развертки. Значение по оси U

изменяются от -180 до 180, а по оси Y от 90. Рассмотрим режущие кромки с наклона углом 15, 30, 45 градусов от оси U на развертке производящей поверхности.



**Рис. 1.** Режущие кромки с наклона углом 15, 30, 45 градусов от оси U на развертке производящей поверхности (а)

В осевом сечении, построенном перпендикулярно нормали, проходящей через линию, построенную на развертке. Прямые линии сферы, связанные с осью, представляют собой кривые, образующие постоянный угол с меридианами. Для формирования графика зависимости изменения угла, были рассмотрены проекции углов построенных линий на виде сверху и в осевом сечении в зависимости от радиуса перпендикулярному оси.

*Определение радиуса заданной точки в сечении перпендикулярном к оси.*

На развертке отведем в сторону на расстояние  $x$  вертикальную линию и в точках пересечения с наклонными линиями поставим узлы. Расстояние  $X$  представляет собой длину дуги в сферических координатах. Длинная дуги на развертке и радиус для выбранной связаны уравнением

$$R' = R_0 \cdot \cos(\tan(\alpha) \cdot X)$$

где  $R'$  - радиус заданной точки в сечении перпендикулярном к оси фрезы,  $\alpha$  – угол наклона линии,  $R_0$  – радиус сферы.

Определения сечения перпендикулярному оси, в котором лежит заданный радиус производилось по формуле

$$R_Z = \sqrt{R_0^2 - (R')^2}$$

$R_Z$  – является координатой оси, через которую проходит плоскость с заданным радиусом  $R'$

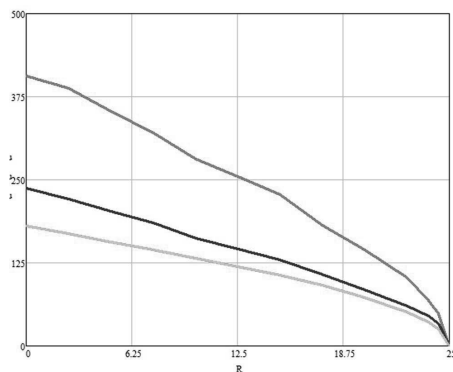
Измерение углов проводилось в двух плоскостях, в осевой плоскости и на виде сверху. В обеих плоскостях замерялся угол между проекцией линии и горизонталью.

Контрольные значение углов наклона режущих кромок с постоянными углами наклона на развертке (15 градусов, 30 и 45) представлены в Таблице 1) в проекции на основную плоскость инструментальной системе координат (рис. 2) и в Таблице 2 в проекции на осевое сечение инструментальной системы координат (рис. 3).

Таблица 1. Изменение углов наклона режущей кромки в проекции на основную плоскость инструментальной системе координат.

Радиус	0	0,1*R	0,2*R	0,3*R	0,4*R	0,5*R
Угол Линии под углом 15	406,554	387,879	352,719	321,069	280,672	254,13
Угол Линия под углом 30	236,9	220,092	202,587	185,464	161,727	145,6
Угол Линия под углом 45	180	168,552	156,765	144,544	132,125	119,408

Радиус	0,6*R	0,7*R	0,8*R	0,9*R	0,95*R	05*R	R
Угол Линии под углом 15	227,901	181,699	144,29	102,91	68,823	48,799	0
Угол Линия под углом 30	129,539	107,184	84,466	59,835	45,284	33,593	0
Угол Линия под углом 45	106,436	91,47	72,887	51,051	36,212	25,456	0

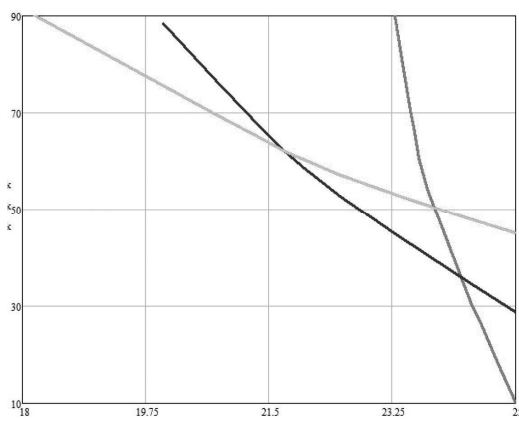


**Рис. 2.** График зависимости изменения угла наклона режущих кромок (15, 30, 45 градусов на развертке сферы) в проекции на основную плоскость инструментальной системе координат в зависимости от величины радиуса в контрольной точке



Таблица 2. Изменение углов наклона режущей кромки в проекции на осевую плоскость инструментальной системе координат.

Радиус	0,9 25* R	0,935 *R	0,940 *R	0,94 25* R	0,94 5*R	0,9 5* R	0,97 5*R	0,98 *R	0,99 *R	R
Угол Линии под углом 15	110 ,68 6	99,61 8	61,45	59,0 64	56,7 51	52. 35 9	26.8 51	21,0 9	19.1 25	15
Радиус	0.8 *R	0,83* R	0,85* R	0,87 *R	0,94 5*R	0,9 *R	0.93	0,95 *R	0,97 5*R	R
Угол Линии под углом 30	0.8 *R	0,83* R	0,85* R	0,87 *R	56,7 51	52. 97 2	44.1 47	38.8 1	34.4 5	30
Радиус	0.7 *R	0,83* R	0,85* R	0,87 *R	0,88 *R	0,9 *R	0.93	0,95 *R	0,97 5*R	R
Угол Линии под углом 45	95. 893	73.03 6	64.44	59.7 18	59.0 05	57. 58 3	53.3 58	50.4 93	47.9 16	45



**Рис. 3.** График зависимости изменения угла наклона режущих кромок (15, 30, 45 градусов на развертке сферы) в проекции на осевую плоскость инструментальной системе координат в зависимости от величины радиуса в контрольной точке

### Заключение

Методики и способы определения координат, используемые в данном исследовании, могут послужить для создания новых схем изготовления сферического

торца, например, уравнение нахождения радиуса применимо для нахождения смещения при заточке.

## Благодарности

Авторы проводили исследования на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ "СТАНКИН".

Выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10353 (<https://rscf.ru/project/22-79-10353/>)

## References

1. Grigoriev, S.N.; Migranov, M.S.; Shekhtman, S.R.; Migranov, A.M.; Ershov, A.A.; Pivkin, P.M. Sensor Information Processing in the Control of Quality Parameters of Functional Coatings of Products Deposited by Vacuum-Arc Spraying. In Proceedings of the SPIE Future Sensing Technologies 2021; SPIE: Online Only, Japan, November 2021; p. 52.
2. Grigoriev, S.N.; Pivkin, P.M.; Grechishnikov, V.A.; Petukhov, Y.E.; Volosova, M.A.; Nadykto, A.B. High-Precision Method for Determining the Optimal Trajectory of Movement of a Conical Grinding Wheel Relative to the Helical Grooves of Solid Ceramic Mills.; Proc. SPIE: Online Only, United Kingdom, September 20 2020; p. 48.
3. Grigoriev, S.N.; Nadykto, A.B.; Volosova, M.A.; Zelensky, A.A.; Pivkin, P.M. WEDM as a Replacement for Grinding in Machining Ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC Cutting Inserts. *Metals* **2021**, *11*, 882, doi:10.3390/met11060882.
4. Grigoriev, S.N.; Volosova, M.A.; Okunkova, A.A.; Fedorov, S.V.; Hamdy, K.; Podrabinnik, P.A.; Pivkin, P.M.; Kozochkin, M.P.; Porvatov, A.N. Electrical Discharge Machining of Oxide Nanocomposite: Nanomodification of Surface and Subsurface Layers. *J. Manuf. Mater. Process.* **2020**, *4*, 96, doi:10.3390/jmmp4030096.
5. Pivkin, P.M.; Nadykto, A.B.; Grechishnikov, V.A.; Volosova, M.A.; Minin, I.V.; Grigoriev, S.N. A New Method for Modeling Edges of a Toroidal Cutting Surface of Solid Ceramic End Mills. In Proceedings of the Proc. SPIE; Online Only, United Kingdom, September 20 2020; Vol. 11540, p. 115401G.
6. Khusainov, R.M.; Golovko, A.N.; Petrov, S.M.; Yurasov, S.Yu.; Balabanov, I.P.; Grechishnikov, V.A.; Romanov, V.B.; Pivkin, P.M. Selecting Optimal Cutting Tools for Lathes. *Russ. Engin. Res.* **2017**, *37*, 351–353, doi:10.3103/S1068798X17040128.
7. Pivkin, P.M.; Grechishnikov, V.A.; Ershov, A.A.; Volosova, M.A.; Nadykto, A.B. Reverse Engineering of Geometric Models of Advanced Curved Edge Drills Using Optical Measuring Systems.; SPIE: Online Only, Spain, September 12 2021; p. 25.
8. Pivkin, P.M.; Grechishnikov, V.A.; Ershov, A.A.; Nadykto, A.B. A New Method for the Precise Determination of Rational Geometric Parameters of the Helical Groove and Cutting Part of High-Performance Tri-Flute. In Proceedings of the Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence V; and Advanced Manufacturing Technologies for Micro- and Nanosystems in Security and Defence III; SPIE: Online Only, United Kingdom, September 2020; p. 36.
9. Grechishnikov, V.; Grigoriev, S.; Pivkin, P.; Volosova, M.; Isaev, A.; Nikitin, D.; Minin, I. Design of Toroid-Shaped Solid Ceramic End Mill. *EPJ Web Conf.* **2019**, *224*, 05001, doi:10.1051/epjconf/201922405001.
10. Grechishnikov, V.A.; Petukhov, Yu.E.; Pivkin, P.M.; Romanov, V.B.; Ryabov, E.A.; Yurasov, S.Yu.; Yurasova, O.I. Trochoidal Slot Milling. *Russ. Engin. Res.* **2017**, *37*, 821–823, doi:10.3103/S1068798X17090106.

11. Abele, E.; Fajara, M.; Schäfer, D. Holistic Approach for a Simulation-Based Twist Drill Geometry Optimization.; ASMEDC: Corvallis, Oregon, USA, January 1 2011; pp. 137–144.
12. Grechishnikov, V.A.; Petukhov, Yu.E.; Pivkin, P.M.; Isaev, A.V.; Romanov, V.B.; Domnin, P.V. Lathe Turning of Complex-Shaped Parts Providing Desired Surface Microrelief. *Russ. Engin. Res.* **2016**, *36*, 229–231, doi:10.3103/S1068798X16030059.
13. Metel, A.; Melnik, Y.; Mustafaev, E.; Minin, I.; Pivkin, P. Combined Processing of Micro Cutters Using a Beam of Fast Argon Atoms in Plasma. *Coatings* **2021**, *11*, 465, doi:10.3390/coatings11040465.
14. Grigoriev, S.N.; Grechishnikov, V.A.; Volosova, M.A.; Jiang, X.; Pivkin, P.M. Investigation of Technological Parameters for Machining Toroidal Section of Solid Ceramic End Mills. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2020**, *971*, 022065, doi:10.1088/1757-899X/971/2/022065.
15. Pivkin, P.M.; Grechishnikov, V.A.; Minin, I.V.; Ershov, A.A.; Voronin, V.; Nadykto, A.B.; Grigoriev, S.N. A New Approach for Controlling of Curved Cutting Edges of Toroid-Shaped End-Milling Cutter.; SPIE: Online Only, United States, April 12 2021;
16. Ahmed, F., Ko, T.J., Lee, J. et al. The effect of tool material grain size on the machining process in ball end milling. *Int J Adv Manuf Technol* **106**, 4411–4421 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04925-7>
17. Pivkin, P.M.; Ershov, A.A.; Nadykto, A.B. Mathematical Modelling of the Cutting Edge of a Tri-Flute Drill.; IEEE: Vladivostok, Russia, October 6 2020; pp. 1–5.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ РИСКА НА ФОНДОВОЙ БИРЖЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Г.В. Плаксунов, Е.М. Красикова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1, krasikova-cat7@yandex.ru

Применение алгоритмов машинного обучения для предсказания цены любого актива позволит увеличить шансы на заключение прибыльных сделок и снизить риски потерь. Эффективность таких алгоритмов не может быть 100 процентной по причине того, что на цены всех активов влияют спрос и предложение, которые могут меняться в зависимости от различных сторонних факторов. Такими факторами могут быть события, никак не связанные с непосредственной деятельностью компании.

В современном мире зависимость различных крупных компаний, чьи акции торгуются на крупнейших фондовых биржах, между собой очень велика. Предсказать последствия нарушений деятельности одной компании на деятельность другой не всегда тривиальная задача, особенно если эти компании напрямую друг с другом не сотрудничают. В связи с этим, алгоритм машинного обучения не сможет гарантировать высокую точность предсказания поведения цены актива в ближайшем, и тем более в отдаленном будущем.

Основными игроками на фондовых биржах являются трейдеры. Это люди или даже компании, которые, используя всю доступную информацию, выдвигают предположения относительно поведения цен тех или иных активов на различных временных участках и, в соответствии с этими предположениями, заключают сделки покупки или продажи акций или любых других активов.

Трейдеры в своей деятельности часто применяют технический анализ. Этот вид анализа применяется на графиках цены актива для обнаружения разнообразных паттернов, которые выступают в роли сигналов и помогают выдвигать предположения касательно стоимости актива в ближайшем будущем.

Алгоритмы машинного обучения позволяют автоматизировать выдвижение предположений о будущем значении цен путем приблизительного подсчета вероятностей различных исходов в будущем. Для тренировки модели используются исторические данные цены (данные о том, сколько актив стоил в прошлом). От количества этих данных, их точности и полноты будет зависеть точность результатов работы алгоритма.

Алгоритм использует исторические данные, как тренировочный датасет. Обнаруживает закономерности поведения цены. Чем более плотно расположены соседние точки данных в тренировочном датасете, тем выше точность предсказания цены. Для предсказания цены, которая будет через час, датасет должен в себе содержать данные о цене, с почасовым срезом. Если же промежуток между соседними точками будет меньше, то появится возможность предсказания цены на меньшие промежутки времени в будущем.

У трейдера нет доступа к бирже напрямую. Для того, чтобы трейдер мог начать торговать, ему необходим брокер – юридическое лицо, обладающее лицензией торговли на фондовой бирже. Брокер ведет торги от лица трейдера, по указанию

трейдера. За каждую сделку брокер взимает с трейдера комиссию, размер которой устанавливается договором.

При анализе данных для открытия или закрытия позиции должна учитываться информация о комиссии брокера, так как размер этой комиссии может повлиять на итоговую прибыльность каждой сделки.

#### **Список литературы**

1. Вьюгин В.В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования. Москва, издательство МЦНМО, 2018. 384 с.
2. Информационно-аналитический ресурс по машинному обучению <http://www.machinelearning.ru/>

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОСТИ КАК ВАЖНЕЙШЕГО КОМПОНЕНТА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

А.А.Плешков

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*Кафедра «Прикладная математика»*

Оптимизация является важным инструментом для моделирования и анализа нелинейных систем, особенно в контексте оптической стабилизации. Принципиальные трудности возникают при попытке измерения оптической передаточной функции на высоких пространственных частотах из-за базовой нелинейности систем оптического изображения. Эта нелинейность оказывает значительное влияние на оценку изображений, особенно на более низких пространственных частотах, и может привести к существенным отличиям в видимых или измеренных передаточных функциях по сравнению с линейными системами.

Для определения параметров нелинейных систем важным является выбор оптимизационных методов, которые могут точно и эффективно оценить параметры, улучшая моделирование оптической стабилизации. Три ключевых метода оптимизации, включая итерационный алгоритм на основе градиента, алгоритм Левенберга-Марквардта и симплексный метод Нелдера-Мида, помогают упростить задачу нелинейной оптимизации. Эти методы были применены к различным нелинейным системам, включая систему Росслера, осциллятор Ван дер Поля и модель «хищник-жертва» Лотки-Вольтерры.

Исследования показали, что симплексный алгоритм Нелдера-Мида обеспечивает наибольшую точность и эффективность в оценке параметров нелинейных систем, что приводит к более низким значениям метрики среднеквадратической ошибки (RMSE). Тщательный выбор подходящего алгоритма оптимизации имеет решающее значение для точной идентификации параметров и качественного моделирования систем. Оптимизация параметров позволяет исследователям более точно моделировать и понимать динамику сложных систем, улучшая тем самым прогнозирование их поведения.

В целом, этот оптимизационный подход к определению параметров нелинейности является важнейшим компонентом моделирования оптической стабилизации и других областей науки и техники. Правильное использование методов оптимизации помогает повысить точность моделей и способствует более глубокому пониманию динамических систем.

### Список литературы

1. Richard J. Becherer and George B. Parrent, "Nonlinearity in Optical Imaging Systems\*," J. Opt. Soc. Am. 57, 1479-1486 (1967)
2. Kumar K. Exploring Optimization Techniques for Parameter Estimation in Nonlinear System Modeling //arXiv preprint arXiv:2305.00351. – 2023.

# МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ В ГИДРАТОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЛЕД-ВОДА<sup>1</sup>

О.Р. Рагимли

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

125047, Миусская пл., д. 4,

E-mail: orxan@rehimli.info

На севере Западной Сибири в ходе освоения нефтегазовых месторождений были обнаружены многочисленные газовые выделения из многолетних мерзлых горных пород. Некоторые из них могут быть связаны с внутримерзлыми газогидратными образованиями. Эти факты были описаны в работах Черского и других ученых [1-3].

Наличие воды, газа и определенного давления при низких температурах создает условия для образования горючего льда [4]. Основными очагами формирования гидратов природного газа являются морские осадочные породы и многолетняя мерзлота. Процесс образования гидратов включает в себя формирование зародышей и накопление гидратов в осадочной породе.

Газовые гидраты чаще всего встречаются в пористых осадочных породах, а большая их часть расположена в пористых средах, таких как пески, глины и известняки [5]. Гидраты являются соединениями молекул газов и воды, образуются при определенных показателях давления и температуры, представляя собой энергетическое сырье, которое можно использовать как альтернативный источник энергии.

В этой работе представлена модель многофазной многокомпонентной фильтрации с совместным включением твердых веществ из газовых гидратов и водно-ледяной смеси. Разработаны вычислительные основы для моделирования процессов многофазной (газ, водно-ледяная смесь, газовые гидраты) тепло- и массопередачи в пористой среде с переменным фазовым составом.

При исследовании задач фильтрации газовых гидратных систем используется метод расщепления по физическим процессам [6, 7]. Система разделяется на два блока - диссипативный, отвечающий за эволюцию термодинамических параметров, и сатурационный, отвечающий за перенос насыщенности и обладающий гиперболическими характеристиками. Это позволяет использовать как явные, так и неявные разностные схемы для достижения высокого качества решения.

Представленная модель фильтрации также разделена на две части: диссипативную и гиперболическую. Для нее разработан вычислительный алгоритм, который работает со всей областью протекания процесса, включая газовые гидраты и водно-ледяные фазы. Это достигается благодаря оригинальной энтальпийной форме гидратизированного уравнения пьезопроводности, которое связывает давление, температуру и объемные доли водно-ледяной системы. Изменение энтальпии в процессе фазового перехода водно-ледяной смеси помогает более точно моделировать процессы тепло- и массопередачи, что важно для исследования сложных газовых гидратно-водно-ледяных систем.

Уравнение балансов массы воды и газа представлены следующим образом:

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-71-10109

$$\frac{\partial}{\partial t} \{m(S_v S_w \rho_{wi} + (1-S_v) \rho_i \beta_w)\} + \text{div}[\rho_w \mathbf{V}_w] + q_w = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \{m(S_v (1-S_w) \rho_g + (1-S_v) \rho_v (1-\beta_w))\} + \text{div}[\rho_g \mathbf{V}_g] + q_g = 0. \quad (2)$$

Уравнение баланса полной внутренней энергии системы, включая скелет, имеет следующий дивергентный вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \{m[S_v(S_w \rho_{wi} \varepsilon_{wi} + (1-S_w) \rho_g \varepsilon_g) + (1-S_v) \rho_v \varepsilon_v] + (1-m) \rho_s \varepsilon_s\} + \\ + \text{div}\{\rho_w \varepsilon_w \mathbf{V}_w + \rho_g \varepsilon_g \mathbf{V}_g + P(\mathbf{V}_w + \mathbf{V}_g)\} + \text{div} \mathbf{W} + q_s = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $m$  – пористость;  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $t$  – время; индексы обозначают:  $v$  – гидрат,  $w$  – жидкая вода,  $g$  – газ,  $i$  – лед,  $s$  – скелет;  $\beta_w$  и  $(1-\beta_w)$  – массовые доли воды и газа в гидрате.  $S_v$  – растепленность порового пространства от гидратов (объемная доля пор с  $\text{H}_2\text{O}$  и свободным газом),  $(1-S_v)$  – гидратонасыщенность порового пространства;  $S_w$  – водонасыщенность,  $S_g = 1 - S_w$  – газонасыщенность.  $\rho_l = \rho_l(P, T)$  – плотности компонент ( $l = g, w, v, s, i$ ),  $\mathbf{V}_\alpha$  и  $q_\alpha$  – скорость фильтрации и плотность источников фазы  $\alpha = w, g$ .  $\{\varepsilon_\chi, \chi = v, wi, w, i, g, s\}$  – внутренние энергии единицы массы гидрата, водно-ледяной смеси, воды, льда, газа и скелета.

Скорости фильтрации жидкой и газовой фаз удовлетворяют закону Дарси:  $\{\mathbf{V}_\alpha = -k_i \cdot k_{rai} / \mu_\alpha (\nabla P - \mathbf{g} \rho_\alpha), \alpha = w, g\}$ , с перерасчетом проницаемостей:  $k_i = k(\mathbf{r}, S_{vi}, P)$  – абсолютная проницаемость с учетом части пор, занятой льдом;  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор;  $k_{rai} = k_{rai}(S_{wi})$  – перерасчет относительных фазовых проницаемостей;  $\mu_\alpha = \mu_\alpha(P, T)$  – динамические вязкости воды и газа,  $\mathbf{g}$  – вектор ускорения свободного падения.

Поток тепла в уравнении внутренней энергии (3) дается как

$$\mathbf{W} = -\{m[S_v(S_w \lambda_{wi} + (1-S_w) \lambda_g) + (1-S_v) \lambda_v] + (1-m) \lambda_s\} \nabla T \quad (4)$$

и определяет общий тепловой поток в среде с коэффициентами  $\{\lambda_\chi(P, T), \chi = v, wi, w, i, g, s\}$ .

Введем некоторые обозначения:

$$C_i + C_w = 1, C_i, C_w$$

– объемные доли твердого льда ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и жидкой воды ( $\text{H}_2\text{O}$ );  $\rho_{wi} = C_w \rho_w + C_i \rho_i$  – плотность водно-ледяной смеси;  $S_{vi} = S_v(1 - (1 - C_w) S_w)$  – объемная доля пор ( $m \delta V$ ) с жидкой водой ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и свободным метаном ( $\text{CH}_4$ );  $S_{wi} = \frac{C_w S_w}{C_w S_w + (1 - S_w)}$  – водонасыщенная доля водно-ледяной смеси (т.е. доля жидкой воды в порах (газ, жидкая вода)). Твердая часть объема пор ( $m \delta V$ ) будет соответственно:

$$(1 - S_{vi}) = [(1 - S_v) + (1 - C_w) S_w S_v].$$

Термодинамические параметры:  $\lambda_{wi} = C_w \lambda_w + (1 - C_w) \lambda_i$  – коэффициент теплопроводности водно-ледяной смеси,  $\varepsilon_{wi} = [C_w \rho_w \varepsilon_w + (1 - C_w) \rho_i \varepsilon_i] / \rho_{wi}$  – ее внутренняя энергия.



Зависимость переменных от давления и температуры в зоне фазового равновесия в итоге сводится к зависимости от давления в силу соотношения фазового равновесия, конкретный вид которого не влияет на математическую структуру системы уравнений, описывающей процесс. Изучению этих соотношений посвящено много исследований. В численных расчетах, проведенных с помощью разрабатываемой модели, использовалась следующая зависимость [8]:

$$T = T_{dis}(P) = A \ln P + B, \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирические константы.

Удельная энтальпия гидрата определяется как сумма удельных энтальпий газа и жидкости, которые входят в его состав с учетом теплоты фазового перехода:

$$\beta_w i_w + (1 - \beta_w) i_g = i_v + h, \quad (6)$$

где  $h$  – скрытая теплота фазового перехода единицы массы гидрата;  $i_l = \varepsilon_l + P/\rho_l$  – энтальпия,  $\varepsilon_l(P, T)$  – внутренняя энергия фаз, индекс  $l \equiv g | w | wi | v$  указывает фазу.

Основное пьезопроводно-диссипативное уравнение теории гидратов для определения термодинамики получаем в следующем виде:

$$\begin{aligned} m \delta_\varepsilon \left\{ S_v \left[ S_w \frac{(\rho_{wi})_l}{\rho_{wi}} + (1 - S_w) \frac{(\rho_g)_l}{\rho_g} \right] + (1 - S_v) \frac{(\rho_v)_l}{\rho_v} + \frac{(m)_l}{m} \right\} + \\ + \frac{\Psi}{m \rho_v} \left\{ m \left[ S_v \left[ S_w \rho_{wi} (\varepsilon_{wi})_l + (1 - S_w) \rho_g (\varepsilon_g)_l \right] + (1 - S_v) \rho_v (\varepsilon_v)_l \right] \right\} + \\ + \frac{\Psi}{m \rho_v} \left[ (1 - m) \rho_s \varepsilon_s \right]_l + \delta_\varepsilon DIG + \frac{\Psi}{m \rho_v} DIG_\varepsilon = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$DIG = \frac{1}{\rho_{wi}} \operatorname{div}(\rho_w \mathbf{V}_w) + \frac{1}{\rho_g} \operatorname{div}(\rho_g \mathbf{V}_g) + \left( \frac{q_w}{\rho_{wi}} + \frac{q_g}{\rho_g} \right), \quad (8)$$

$$DIG = \frac{1}{\rho_{wi}} \operatorname{div}(\rho_w \mathbf{V}_w) + \frac{1}{\rho_g} \operatorname{div}(\rho_g \mathbf{V}_g) + \left( \frac{q_w}{\rho_{wi}} + \frac{q_g}{\rho_g} \right). \quad (9)$$

Здесь

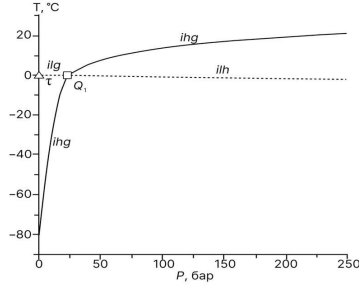
$$\frac{\Psi}{m \rho_v} = \left( \varphi - \frac{1}{\rho_v} \right) \geq 0, \quad \varphi = \frac{\beta_w}{\rho_{wi}} + \frac{(1 - \beta_w)}{\rho_g} \quad (10)$$

– скачок удельного объема (на единицу массы),

$$\delta_\varepsilon = \beta_w \varepsilon_{wi} + (1 - \beta_w) \varepsilon_g - \varepsilon_v \geq 0 \quad (11)$$

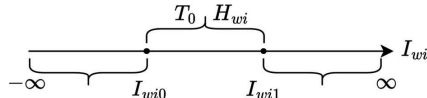
– скачок удельной внутренней энергии (на единицу массы).

В зоне четырехфазового невариантного равновесия гидратов  $Q_1$  (рис. 1) присутствуют гидрат, вода, лед и газ. Температура и давление в этой зоне являются постоянными, в то время как объемная доля льда  $C_w$  и энтальпия  $I_{wi}$  изменяются.



**Рис. 1.** P, T-фазовая диаграмма системы метан – вода;  
 $Q_1$  – четырехфазное невариантное равновесие (*ihg*), где *i* – лед,  
*l* – жидкая водная фаза, *h* – гидратная фаза, *g* – газовая фаза [9].

На Рис. 2 изображены энтальпийные зоны чистого льда ( $-\infty; I_{wi0}$ ), водно-ледяной смеси [ $I_{wi0}; I_{wi1}$ ] и жидкой воды [ $I_{wi1}; +\infty$ ].



**Рис. 2.** Энтальпийные зоны.

Здесь  $I_{wi}$  – энтальпия водно-ледяной смеси,  $I_{wi0} = c_{pi}T_0$  – значение энтальпии, соответствующее переходу из чисто ледяной фазы в водно-ледяную смесь. Соответственно  $I_{wi1} = I_{wi0} + H_{wi}$  – значение энтальпии при переходе из водно-ледяной смеси в жидкую воду,  $c_{pi}$  – теплоемкость льда при постоянном давлении,  $c_{pw}$  – теплоемкость воды при постоянном давлении,  $H_{wi}$  – скрытая теплота плавления.

Рассматривается основной блок пьезопроводно-диссипативных уравнений теории гидратов в энтальпийной форме (см. рис. 2). Уравнение пьезопроводности (7) при этом переписывается для гидратно-равновесной зоны в следующей форме:

$$D_l \frac{\partial I_{wi}}{\partial t} + \delta_\varepsilon DIG + \frac{\Psi}{m\rho_v} DIG_\varepsilon = 0,$$

$$D_l = m\delta_\varepsilon \left\{ S_v \left[ S_w \frac{(\rho_{wi})_l}{\rho_{wi}} + (1 - S_w) \frac{(\rho_g)_l}{\rho_g} \right] + (1 - S_v) \frac{(\rho_v)_l}{\rho_v} + \frac{(m)_l}{m} \right\} +$$

$$+ \frac{\Psi}{m\rho_v} \left\{ m \left\{ S_v \left[ S_w \rho_{wi} (\varepsilon_{wi})_l + (1 - S_w) \rho_g (\varepsilon_g)_l \right] + (1 - S_v) \rho_v (\varepsilon_v)_l \right\} + \right.$$

$$\left. + [(1 - m) \rho_s \varepsilon_s]_l \right\},$$

$$DIG = \frac{1}{\rho_w} \operatorname{div}(\rho_w \mathbf{V}_w) + \frac{1}{\rho_g} \operatorname{div}(\rho_g \mathbf{V}_g) + \left( \frac{q_w}{\rho_w} + \frac{q_g}{\rho_g} \right),$$

$$DIG_\varepsilon = (\varepsilon_w - \varepsilon_{wi}) \operatorname{div}(\rho_w \mathbf{V}_w) + \rho_w \mathbf{V}_w \nabla \varepsilon_w + \rho_g \mathbf{V}_g \nabla \varepsilon_g + \operatorname{div} [P(\mathbf{V}_w + \mathbf{V}_g)] + \operatorname{div} \mathbf{W} + (q_\varepsilon - \varepsilon_{wi} q_w - \varepsilon_g q_g).$$

Переменные  $T$ ,  $P$ ,  $C_w$  и все зависящие от них величины представляются функциями удельной энтальпии единицы массы, во всей области изменения термодинамических переменных. Уравнение пьезопроводности таким образом решается в энтальпийной форме. Далее производится вычисление насыщенностей в сатурационных блоках при фиксированных значениях термодинамических переменных.

Разработанные численные методы применимы к решению двумерных и трехмерных задач, а также к одномерным задачам, которые могут иметь значение для научных, технологических и экологических исследований [10].

Рассматривается одномерная горизонтальная задача без гравитации в декартовых координатах  $x \in [0, L]$ ,  $L$  – длина расчетной области. Параметры выбираются из условий существования гидратов метана. Предполагается, что первоначально поровое пространство однородным образом заполнено водой, газом и газовым гидратом. На границах ставятся непротекаемые краевые условия, т.е. поток воды и газа через них нулевой. Для расчета были выбраны значения физических и механических параметров, характерные для газогидратных задач [10].

На рисунках 3–4 приведены результаты численных расчетов динамической стадии процесса. Расчеты представлены на моменты времени 1, 10, 100, 1000 и 3000 с, с пространственным шагом  $h = 0.01$  м и временным шагом  $\tau = 0.001$  с.

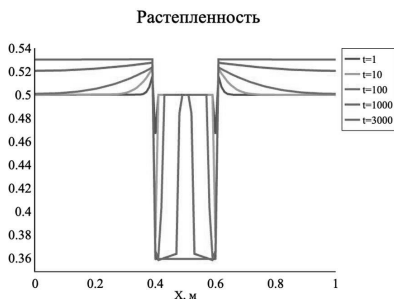


Рис.3. Распределение растепленности.

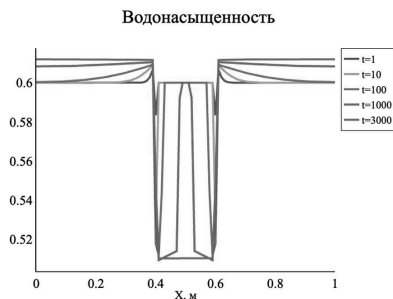


Рис.4. Распределение водонасыщенности.

Расчеты показали, что в водно-ледяной зоне со временем происходит фазовая льдисто-гидратная трансформация с таянием льда, что энергетически компенсируется дополнительным намерзанием гидрата.

### Список литературы

1. Черский Н.В., Царев В.П., Никитин С.П. Исследование и прогнозирование условий накопления ресурсов газа в газогидратных залежах. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1983.
2. Гинсбург Г.Д., Грамберг И.С., Соловьев В.А. Геология субмаринных газовых гидратов // Советская геология, №11. 1990, С. 12-19.
3. Арэ Ф.Э. Термоабразия берегов моря Лаптевых и ее вклад в баланс наносов моря // Криосфера Земли, т.2, №1. 1998, С. 55–61.
4. Chen B., Sun H., Zhao G., Wang B., Zhao Y., Yang M. Experimental observation of methane hydrate dissociation via different depressurization modes under water phase flow // Fuel, 2021, v.283, P. 118908.
5. Clennel M.B., Hovland M., Booth J.S., Henry P., Winters W.J. Formation of natural gas hydrates in marine sediments 1. Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v.104. 1999, P. 22985–23003.
6. Повещенко Ю.А., Казакевич Г.И. Математическое моделирование газогидратных процессов // Математические машины и системы, №3. 2011, С. 105–110.
7. Poveshchenko Yu.A., Rahimly P.I., Rahimly O.R., Podryga V.O., Gasilova I.V. A numerical approach to study the thermal influence on gas hydrates by physical process splitting // IJNAM, v.17, №3. 2020, P. 404–433.
8. Дегтярев Б.В., Бухгалтер Э.Б. Борьба с гидратами при эксплуатации газовых скважин в северных районах. – Москва: Недра, 1976.
9. Дядин Ю.А., Гушин А.Л. Газовые гидраты // Соросовский образовательный журнал, №3. 1998, С. 55-64.
10. Казакевич Г.И., Повещенко Ю.А., Подрыга В.О., Рагимли П.И., Рагимли О.Р. Численное моделирование характерных задач диссоциации газовых гидратов в пористой среде. Одномерная постановка // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, №22. 2019, 15 с. DOI: 10.20948/prepr-2019-22

# К ВОПРОСУ О ПОЛУЧЕНИИ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ГЛУБОКОГО КОСМОСА

А.О. Рейтлингер, Л.А. Уварова, Ю.А. Виноградова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Москва, Вадковский пер., д.3а.

[uvar11@yandex.ru](mailto:uvar11@yandex.ru)

В связи с тем, что в настоящее время активно развиваются различные направления космических исследований, актуальным становится проведение исследований и разработка новых технологий, пригодных для изучения экзопланет. Как известно, часть экзопланет по важным параметрам подобны Земле и пригодны для их освоения и, может быть, жизни. В настоящее время имеются оценки землеподобных планет в нашей галактике от 5 до 20 миллиардов. На 6 декабря 2021 года в каталоге жизнеспособных экзопланет присутствует 59 подтверждённых экзопланет. Основная проблема их удалённость на очень большие расстояния от Земли (от нескольких световых лет до нескольких сотен световых лет, например, одна из жизнеспособных планет, Kepler-1649 находится на расстоянии 300 световых лет). Так что одним из способов поиска экзопланет является метод гравитационного микролинзирования, который основан на общей теории относительности Эйнштейна и искривлении под действием гравитации электромагнитных лучей. Данный метод основывается на том, что луч от звезды, находящейся рядом с экзопланетой, искажается, проходя вблизи массивного объекта.

Поскольку планеты находятся на разном и очень большом расстоянии от Земли, то отправленные и полученные сигналы от разных планет позволят в какой-то степени проводить сравнительный анализ эволюции жизнеспособных планет.

В данной работе рассмотрена передача сигнала по квантовому каналу по механизму квантовой телепортации. Согласно результатам Хирози Оогури и М. Марколли квантовая запутанность порождает дополнительные измерения для гравитационной теории. Это даёт возможность интерпретировать квантовую запутанность как условие, налагаемое на плотность энергии. Такие условия должны удовлетворяться в любой квантовой теории гравитации, согласованной и не противоречащей как ОТО, так и квантовой механике. Учитывается также модифицированное уравнение Белла, включающее множитель, описывающий положение той или иной рассматриваемой системы в пространстве и времени.

Инструменты для поиска планет на телескопах 8-метрового класса теперь обычно достигают контраста, аналогичного космическому телескопу Джеймса Уэбба: от  $10^{-5}$  до  $10^{-6}$  на расстоянии, менее угловой секунды от родительских звезд. Для обнаружения близнеца Земли требуется контраст  $10^{-9}$  или лучше в пределах менее 0,1 угловой секунды от звезды. Приборы, основанные на передаче информации через квантовые каналы связи, дадут возможность проводить исследования более эффективно: изучать эволюцию планет, состав и структуру их атмосфер.

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА СЕМАНТИЧЕСКОЙ (КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ) МОДЕЛИ

О.А. Рожкова, О.В. Новоселова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: (+7 985)4180070, e-mail: [OksanaARoz@yandex.ru](mailto:OksanaARoz@yandex.ru),

Тел.: (+7 985)7736333, e-mail: [ovnovoselova@yandex.ru](mailto:ovnovoselova@yandex.ru)

**Аннотация:** В статье приведена методика проверки корректности заполнения спецификации, а также матричной диаграммы, описывающей концептуальную (семантическую) модель в целом для ее дальнейшего анализа. Дано краткое описание концептуального моделирования по методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ). В статье рассматривается алгоритм проверки табличного описания матричной диаграммы, который позволит специалистам найти и исправить ошибки. Данные ошибки могут повлечь за собой несоответствия полученной модели смыслу решаемой задачи, что приведет к некорректной работе разработанной системы.

**Ключевые слова:** методология автоматизации интеллектуального труда, концептуальное моделирование, матричная диаграмма.

В силу усложнения разрабатываемых систем - информационных, автоматизированных, информационно-активных, интеллектуальных, производственных и пр. происходит увеличение количества информации, которую необходимо обработать при автоматизации задачи для ее выполнения в вычислительной среде. Перед программной реализацией необходимо решить, как организовать передачу и обработку информации, то есть создать алгоритм обработки данных. Это привело к появлению методов моделирования предметных задач, которые позволили строить модели разрабатываемых программных продуктов.

На кафедре «Информационные технологии и вычислительные системы» разработана методология автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), которая определяет промышленный способ создания прикладных автоматизированных систем [1].

Главной задачей МАИТ является представление предметной задачи в виде последовательности формализованных моделей. На основе сформированной начальной модели формируется концептуальная модель, далее получают инфологическую модель (ИЛМ) и даталогическую модель (ДЛМ).

Концептуальное моделирование обеспечивает смысловое (семантическое) единство всех последующих модельных представлений автоматизируемой предметной задачи путем представления системы знаний предметной области на понятийном уровне. Концептуальная модель характеризуется высоким уровнем абстракции и отражает смысловую (содержательную) структуру рассматриваемой предметной области.

В рамках данной работы более подробно будет рассмотрен этап концептуального моделирования. Концептуальная модель состоит из концептуальной структуры (КС), системы предметных зависимостей (СПЗ) и модели в целом.

Процесс формирования концептуальных структур включает процедуры:

- формирования множества предметных категорий (ПК);
- формирование множества бинарных связей между ними;
- формирование множества тернарных связей между ПК, схем предметных категорий и бинарных связей между ними.

Результаты формирования концептуальной модели предметной задачи отображаются в диаграммах и формах модельного представления, представленных на рисунке 1.

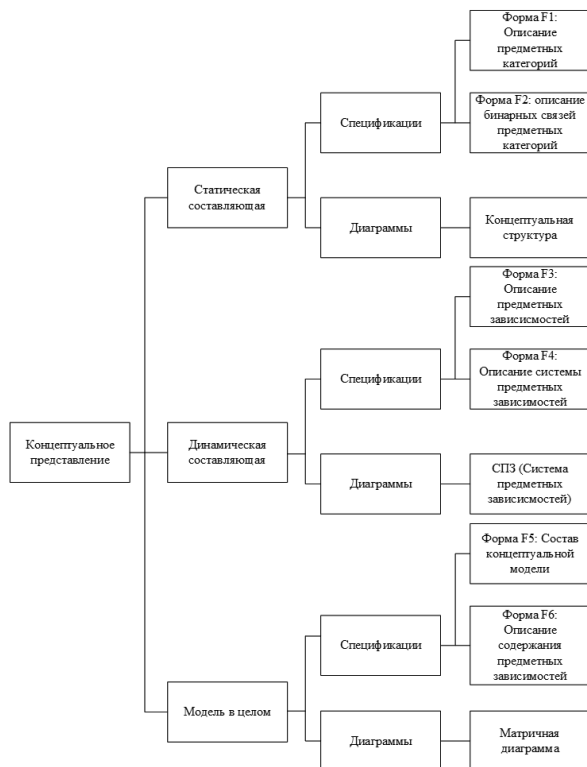


Рис. 1. Структура описания концептуальной модели

При разработке автоматизированных систем на этапе исследования предметной области и проектирования возникает необходимость получения знаний из различных источников, таких как: специализированная литература, научные издания и эмпирический опыт коллег в указанной сфере. Полученную информацию необходимо обработать и структурировать, в результате чего строится концептуальная модель.

В связи с тем, что литература написана специалистом или группой специалистов, она может содержать в себе некоторое количество предметных аксиом, которые не нуждаются в письменном уточнении и повторении, но являются важными при решении задач автоматизации в данной области. Качественное описание «очевидных» фактов предметной области сокращает количество потенциальных ошибок при проектировании автоматизированной системы.

При формировании диаграмм и спецификаций модели требуется учитывать корректность применения правил ее описания (т.е. синтаксис нотации), в том числе правильность отражения связанности диаграмм. Помимо этого, необходимо отслеживать полноту модели, ее адекватность и соответствие смыслу решаемой задачи, подлежащей автоматизации.

Обеспечение выполнения требований анализа концептуальной модели подразумевает следующие этапы:

- анализ концептуальной структуры (КС):
  - проверка корректности построенной КС;
  - проверка корректности заполнения спецификаций F1, F2;
- анализ системы предметных зависимостей:
  - проверка корректности взаимосвязи предметных зависимостей;
  - проверка корректности заполнения спецификаций F3, F4;
- анализ модели в целом:
  - проверка корректности построения матричной диаграммы;
  - проверка корректности заполнения спецификации F5, F6.

Подготовка моделей к проверке предварительно проводится в ручном режиме, т.е. специалист анализирует модели на предмет соответствия классу объектной задачи и правильности ее построения.

Можно выделить основные требования к проверке моделей [2]:

- валидация - процесс определения степени соответствия расчетной модели реальному физическому объекту в рамках области планируемого использования данной модели;
- адекватность - заключается в анализе ее соразмерности с исследуемой системой, а также равнозначности системе;
- корректность - используется для оценки основных свойств модели, оно представляет ряд требований к свойствам моделей.

В настоящее время разработаны методики проверки корректности заполнения спецификаций для всех структур и систем концептуальной модели. В качестве примера рассмотрим алгоритм проверки матричной диаграммы.

Матричная диаграмма формируется на основе форм, которые заполняются во время декомпозиции предметной задачи и формирования системы предметных зависимостей (динамическая составляющая), а также форм, учитывающих описание концептуальной структуры (статическая составляющая).

Отношения, описывающие взаимосвязи основной статической и динамической составляющих модели предметной задачи можно представить в следующем виде [3]:

$$R_2^{KP-1}(n) \subset A(n) \times A(n) \times \dots \times A(n) \times \bar{W}(n),$$

$$R_2^{KP-1}(n) = \{r_t^{KP2-1} | r_t^{KP2-1}: (a_{j1}, \dots, a_{jq}) \rightarrow \bar{w}_{ps}\}.$$

$r_t^{KP2-1}$  - предметная зависимость 1 рода,  $r_t^{KP2-1}$  – предметная зависимость 2 рода.

Для предметных зависимостей 1 и 2 рода определена типология. Методически для концептуальной модели в спецификациях описаны предметные зависимости 1 рода. Для предметных зависимостей 1 рода типы взаимосвязей фиксируют для основной статической структуры - на основе ограничений на взаимосвязи структурных предметных категорий (ПК) в рамках однородных или разнородных контекстуальных ПК верхнего класса.

Соотношения между предметными зависимостями и предметными категориями можно представить в общем виде:

$$\bar{w}_{ps}(i, t, u_{sp}) = (a_{j1}, \dots, a_{jq}) \& Q_{it}^{sp}(n),$$

где  $Q_{it}^{sp}(n)$  – отражает соотношения структурных и контекстуальных предметных категорий и индекс  $u_{sp}$  определяет *sp-e* ограничение или предметную зависимость для предметной задачи и определяет подмножество множества предметных категорий, участвующих в данной предметной зависимости.

Согласно методологии МАИТ матричная диаграмма целиком отражает концептуальную модель и является удобным способом для выявления ошибок и



несоответствий в модели. С ее помощью можно проводить анализ правильности выполнения алгоритма предметной задачи.

Благодаря наличию проверки матричной диаграммы, специалисты могут найти и исправить ошибки, которые повлекли бы за собой дальнейшие несостыковки или же неправильное выполнение алгоритма, при неблагоприятном исходе - невыполнение алгоритма.

Матричная диаграмма представляет собой таблицу с двумя заголовками: вертикальный заголовок формируется в соответствии с системой предметных зависимостей (последовательность обхода алгоритма решения задачи сверху-вниз, слева-направо), горизонтальный заголовок формируется на основе концептуальной структуры (список признаков с учетом их распределения по объектам и другим классам предметных категорий). В поле, образованном заголовками, для каждой простой предметной зависимости отмечают ролевые свойства признаков, участвующих в действии алгоритма. Для функции действия – «\*», для аргумента – «+», для аргумента по умолчанию – «.» . Для сложной предметной зависимости указывают ролевые свойства признаков, определяющие типовые и базовые конструкции в алгоритмах: последовательность – «[ , ]», переключатель – «?, #, /», цикл – «!, {, }, \$» (рис. 2).

В спецификации F6 фиксируются все значения из матричной диаграммы, соответственно по ней также можно определить правильность и корректность построенной модели (рис. 3).

		R3.1	R3.2	R3.3	R4.1	R4.2	R5.1	R5.2	R5.3
[	c11								
[	c21								
[	c31								
[	c41								
#?	c51						#		
#?/	c61						#		
/	c71						*		
/	c72						*		
/	c73						*		
/	c74						*		
#?/	c62						#		
/	c75						*		
/	c76						*		
/	c77						*		
/	c78						*		
#?/	c63						#		
/	c79						*		
/	c7.10						*		

Рис. 2. Фрагмент матричной диаграммы расчёта клиноремной передачи

Код ПЗ-1	Структ. св-во ПЗ-1	Код ПК	Роль ПК	Структ. св-во ПК	Объем. св-во ПК	Особ. роль ПК
c11	[	R9.18				ФП
c21	[	R7.1				ФП
c31	[	R5.25				ФП
c41	[	R5.22				ФП
c51	#	R5.1				ФА
c51	?	R5.16				АА
c61	#	R5.1				ФА
c61	?	R5.12				АА
c61	/	R5.16				АА
c61		R5.16	A-y			
c71	/	R5.12				АА

Рис. 3. Фрагменты спецификации F6

Читая полученную матрицу, можно определить множество ошибок, например:

- 1) использование признака раньше его получения (если после «\*» не находится знак «+» или же «./»);
- 2) использование альтернативы без необходимых аргументов (после под «#» только один знак «\*»);

- 3) использование аргумента, значение которого так и не будет получено ни в одной ветке (если под «#» нет знака «\*»).

Приведем фрагмент алгоритма проверки матричной диаграммы (рис. 4):

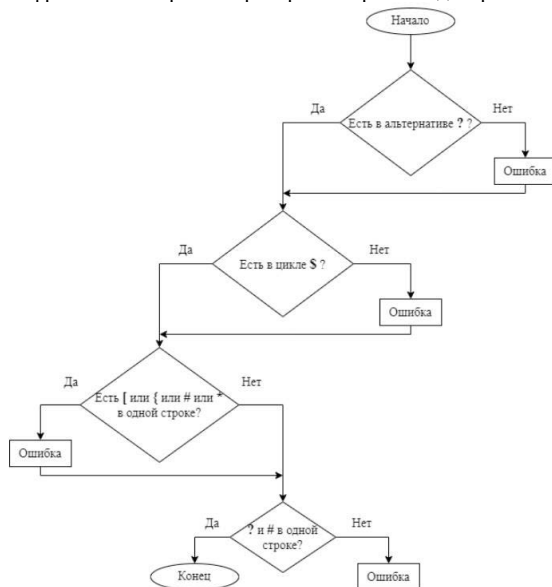


Рис. 4. Алгоритм поиска ошибок в матричной диаграмме по строкам

Методика позволяет проверить корректность заполнения спецификации и одновременно семантическую правильность построенного алгоритма, так как использование признака раньше его получения определяет ошибку в алгоритме, связанную с неправильной последовательностью действий.

Для дальнейшей работы с моделями необходимо провести качественный анализ построенной модели, ее адекватности и соответствия смыслу решаемой задачи. Приведенный алгоритм позволяет подтвердить полноту модели и возможность атомизации задачи.

### Список литературы

1. Волкова Г. Д., Григорьев, О. Г., Новоселова О. В. Исследование методологии, методов и подходов, применяемых при проектировании прикладных автоматизированных систем // Межотраслевая информационная служба. 2014. № 4. С. 19-31.
2. Ширчков Д. А. Развитие метода анализа матричной диаграммы инфологической модели предметной задачи // Контентант. 2018. Том 17. № 1. С. 56-60.
3. Хтве Н. Н., Волкова Г. Д., Тюрбева Т.Б. Формальное описание классификации и обработки концептуальной модели объектного уровня для предметной задачи // Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал: Материалы III всероссийской научно-практической конференции. Вологда, 2020. С. 73-78.

## ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СОЦИО-ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

### THE PROBLEMS OF THE COMPLEX NONLINEAR SOCIO- ECOLOGICAL-ECONOMIC SYSTEM MODELING

Е.Ю. Романова<sup>1</sup>, Т.В. Карлова<sup>2</sup>, Л.А. Уварова<sup>3</sup>  
E.Yu. Romanova<sup>1</sup>, T.V. Karlova<sup>2</sup>, L.A. Uvarova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ТВЕРСКОЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) АНО ВО МГЭУ,  
170006, Россия, Тверь, улица Дмитрия Донского, д. 37

<sup>2</sup>ФГБУН Институт конструкторско-технологической информатики РАН,  
127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, д.18, стр. 1А

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»,  
127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, д. 3а  
e-mail: uvarova@stankin.ru, [kati-v@yandex.ru](mailto:kati-v@yandex.ru)

<sup>1</sup>TVER BRANCH OF MOSCOW HUMANITIES AND ECONOMICS UNIVERSITY,  
170006, Russia, Tver, Dmitry Donskoy Street, 37

<sup>2</sup>Institute of Design and Technological Informatics of the RAS,  
127055, Russia, Moscow, Vadkovskiy lane, 18, 1A

<sup>2</sup>MSTU «STANKIN»,  
127055, Russia, Moscow, Vadkovskiy lane, 3a

Обсуждается схема-модель сложной нелинейной социо-эколого-экономической системы; взаимосвязь частей системы; видов социальных изменений под воздействием внутренних и внешних факторов; наиболее вероятный математический метод моделирования подобной системы. Предполагается, что: 1) взаимодействие элементов системы осуществляется посредством обмена информацией; 2) функциональная информация управляет информационным процессом в системе и определяет ее структуру.

It is discussed: the schematic model of the complex nonlinear socio-ecological-economic system; the interrelation of the system parts; the types of the social changes under the influence of the external and internal factors; the most probable mathematical method for the modeling such system. It is assumed that: 1) the interaction of the system elements is carried out through the information exchange; 2) the functional information controls the information process in the system and determines its structure.

**Ключевые слова:** модель, социо-эколого-экономическая система, воздействие, взаимосвязь, структура, информация.

**Keywords:** model, socio-ecological-economic system, interrelation, interaction, structure, information.

В современных условиях при рассмотрении и моделировании социальных систем необходимо учитывать их взаимодействие с экономическими и экологическими

системами. XXI век ознаменовался серьезными изменениями в экономике, экологии, климата в разных аспектах, которые определяются как человеческой деятельностью, так и политическими, экономическими, природными событиями. В сложившейся ситуации очевидно, что моделирование социальной системы представленной на рис. 1



Рис.1. Схема - модель структуры социальной системы [1, стр. 169].

Согласно подобной структуре можно представить следующие виды изменения социальной системы:

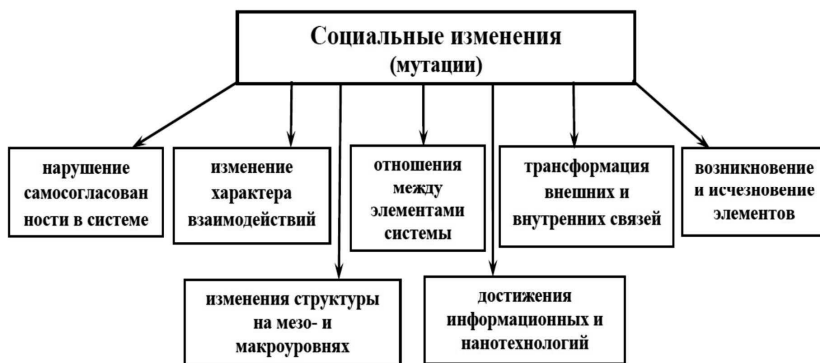


Рис.2. Виды социальных изменений [2, стр. 172].

Все части системы взаимосвязаны, а в равновесном состоянии их функционирование самосогласовано, но в настоящее время такое состояние нереально. Чтобы добиться лучшего соответствия модели реальности при моделировании необходимо: 1) учитывать взаимодействие с экономической и экологической системами; 2) проанализировать характер этих взаимодействий; 3) определить, какие из математических методов можно использовать для моделирования.

В работах [3, 4] анализируются эколого-экономические отношения. Показано, что в экономическом и экологическом плане в конце XX века и в начале XXI века характерны экономические и экологические кризисные ситуации, которые имеют как антропогенный, техногенный так и природный характеры. Большую опасность представляют чрезвычайные ситуации (ЧС), характер которых можно представить следующей схемой:



Рис.3. Схема чрезвычайных ситуаций.

На рис 4 показаны составляющие прямого и косвенного социального ущерба. Очевидно, что необходимо прогнозировать и анализировать экологические и экономические последствия ЧС для реализации управленческих решений по снижению риска, уменьшению последствий катастроф, аварий и т.п., улучшения социальной обстановки за счёт возможного урегулирования социальных изменений на федеральном и региональном уровнях.



Рис.4. а) Составляющие прямого социального ущерба; б) факторы, формирующие косвенный социальный ущерб [4, стр. 235].

На рис 5 представлены прямой и косвенный экономический ущерб:



Рис.5. Составляющие прямого экономического ущерба и факторы, формирующие косвенный экономический ущерб [4, стр. 246].

Состояние и структура любой сложной нелинейной системы определяется обычно набором переменных параметров, среди которых выделяется параметр порядка – управляющий параметр, который используется для моделирования [5]. Так, например, согласно Г. Хакену роль управляющего параметра в социальных системах играет общественное мнение, которое подчиняет себе индивидуумов, распространяется по всей системе, определяя взаимодействие между упорядоченной структурой и отдельными ее элементами, тем самым сохраняя или разрушая структуру системы.

В некоторых работах по моделированию социальных систем (например, [6]) используется понятие коллективного социального поля, определяющего взаимодействие частей системы.

С учетом вышеприведенного материала можно представить следующую схему-модель рассматриваемой сложной нелинейной социо-эколого-экономической системы:



Рис. 6. Схема-модель сложной нелинейной социо-эколого-экономической системы, где  $S_{0i}$  – начальные состояния частей системы.

Управляющим параметром можно считать функциональную информацию. Вся система в целом является самоорганизованной и протекающие в ней процессы когерентны, что обеспечивается обменом информацией (сигналами) между структурными частями системы [7]. За счет такого обмена ценной информацией – функциональной информацией система может переходить из одного состояния в другое, т.е.  $S_{0i} \rightarrow S_{ji}$ . Для построения модели рассматриваемой системы можно использовать следующие положения: 1) используется математический аппарат непрерывной цепи Маркова; 2) состояния частей системы обозначаются  $S_{ji}$ , начальные состояния –  $S_{0i}$ . Переходы из одного состояния в другое происходят под действием потоков информации (ценной информации); 3)  $\lambda_{ji}$  – интенсивность информационного потока; 4) необходимо построить различный граф системы; 5) составляется система дифференциальных уравнений Колмогорова согласно следующему алгоритму [8, 9]:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} P_j(t) - P_i(t) \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \quad (1),$$

где  $P_i(t)$  – вероятность состояния частей системы.  $\lambda_{ij}$  и  $\lambda_{ji}$  – интенсивности потоков информации;  $\lambda_{ji} P_j(t)$  и  $P_i(t) \lambda_{ij}$  – потоки вероятностей переходов  $S_{ji} \leftrightarrow S_{ij}$ . Для любого момента времени для вероятностей состояний должно выполняться условие нормировки  $\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1$ .

Решение системы дифференциальных уравнений Колмогорова с учетом условия нормировки дает значения предельных вероятностей, которые характеризуют среднее относительное время существования системы в том или ином состоянии. Меняя значения интенсивности потоков информации  $\lambda_{ij}$  с учетом условия  $0 \leq \lambda_{ij} \leq 1$ , можно рассматривать различные режимы состояний системы, в том числе устойчивые, не стабильные, условия разрушения структуры системы.

### Система литературы

1. Романова Е.Ю. Анализ свойств и структуры нелинейной социальной системы.// Сб. тезисов четвертой международной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем». – М.: Янус-К, 2019. – 232 с.
2. Романова Е.Ю. Качественный анализ возможных изменений социальной системы и обсуждение математической модели и эволюции.// Сб. тезисов четвертой международной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем». – М.: Янус-К, 2019. – 232 с.
3. Васильева Л.Ю., Чернавская Н.М. Организация эколого-экономических отношений.// Сб. н. тр. «Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем» четвертой международной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем». – М.: Янус-К, 2011. – 420 с.
4. Чернавская Н.М., Васильева Л.Ю., Плескачева Т.Б., Домбровская В.Е. Эколого-экономическая деятельность предприятий при техногенезе и чрезвычайных ситуациях. – М.: Янус-К, 2010. – 332 с.
5. Хакен Г. Тайны природы. Синергетика: учение о воздействии. – Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 320 с.
6. Гуц А.К., Паутова Л.А., Фролова Ю.В. Математические методы в социологии. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 214 с.

7. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – М.: КомКнига, 2005. – 248 с.
8. Бережная Е.В., Бережной В.И. Математические методы моделирования экономических систем: Учеб. пособия. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 368 с.
9. Вентцель Е. С. Исследование операций. – М.: Высшая школа, 2001 – 208 с.

#### References

1. Romanova E.Y. Analysis of the properties and structure of a nonlinear social system. // Book of abstracts of the fourth international conference "Modeling of nonlinear processes and systems". – М.: Janus-K, 2019. – 232 p.
2. Romanova E.Y. Qualitative analysis of possible changes in the social system and discussion of the mathematical model and evolution.// Collection of abstracts of the fourth international conference "Modeling of nonlinear processes and systems". – М.: Janus-K, 2019. – 232 p.
3. Vasilyeva L.Yu., Chernavskaya N.M. Organization of ecological and economic relations. // Book of abstracts "Fundamental physical and mathematical problems and modeling of technical and technological systems" of the fourth international conference "Modeling of nonlinear processes and systems". – М.: Janus-K, 2011. – 420 S.
4. Chernavskaya N.M., Vasilyeva L.Yu., Pleskacheva T.B., Dombrovskaya V.E. Ecological and economic activity of enterprises in technogenesis and emergency situations. – М.: Janus-K, 2010. – 332 p.
5. Haken G. Secrets of nature. Synergetics: the doctrine of impact. – Moscow – Izhevsk: Institute of Computer Research, 2003. 320 p.
6. Guts A.K., Pautova L.A., Frolova Yu.V. Mathematical methods in sociology. – М.: Book house "LIBROCOM", 2014. – 214 p.
7. Haken G. Information and self-organization. A macroscopic approach to complex systems. – М.: KomKniga, 2005. – 248 p.
8. Berezhnaya E.V., Berezhnoy V.I. Mathematical methods of modeling economic systems: Textbooks. – М.: Finance and statistics, 2001. – 368 p.
9. Wentzel E. S. Operations research. – М.: Higher School, 2001 – 208 p.



**АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ  
БИОНАНОКОМПЛЕКСОВ, СОДЕРЖАЩИХ  
ИОНЫ d-МЕТАЛЛОВ В АКТИВНЫХ ЦЕНТРАХ**

**ANALYSIS OF THE FACTORS DETERMINING THE FUNCTIONING OF  
SPECIFIC BIONANOCOMPLEXES CONTAINING d-METAL IONS IN ACTIVE  
CENTERS**

**Е.Ю. Романова<sup>1</sup>, Л.А. Уварова<sup>2</sup>  
E.Yu. Romanova<sup>1</sup>, L.A. Uvarova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ТВЕРСКОЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) АНО ВО МГЭУ,  
170006, Россия, Тверь, улица Дмитрия Донского, д. 37  
<sup>2</sup>ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»,

127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, д. 3а  
e-mail: [uvarova@stankin.ru](mailto:uvarova@stankin.ru), [kati-v@yandex.ru](mailto:kati-v@yandex.ru)

<sup>1</sup>TVER BRANCH OF MOSCOW HUMANITIES AND ECONOMICS UNIVERSITY,  
170006, Russia, Tver, Dmitry Donskoy Street, 37  
<sup>2</sup>MSTU «STANKIN»,  
127055, Russia, Moscow, Vadkovskiy lane, 3a

Бионаноконплексы – это специфические самоорганизующиеся, нелинейные ферментативные системы. Активные центры таких систем содержат ионы d-металлов: *Zn(II)*, *Fe(II)*, *Mn(II)*, *Co(III)*, *Cu(II)*, *Mn(III)*, которые определяют структуру активного центра. На рис. 1 представлена схема-модель структуры таких бионаноконплексов [1]:



Рис. 1 Схема-модель структуры бионаноферментативного комплекса (МО-молекулярные орбитали) [1, стр. 175].

Все подобные ферментативные бионаноконплексы принимают участие в процессах жизнедеятельности.

Несмотря на то, что активные центры содержат ионы различных d-металлов, следовательно, имеют различную стереохимическую структуру и выполняют

различные функции: от переноса ионов, кислорода до катализа различных биохимических реакций, в их функционировании выявлены общие закономерности, которые были выяснены с помощью квантово-химических моделей активных центров, рассмотренных ранее авторами в ряде работ (например, [2-4]). Таким образом, основные факторы, определяющие функционирование комплексов, следующие: 1) ионы d-металлов связаны с ближайшим окружением через пептидный азот или кислород посредством их не поделённой пары электронов и вакантных орбиталей ионов d-металлов; 2) взаимодействие активных центров с субстратами (по принципу «ключ-к-замку») переводит их в возбужденное состояние, что приводит, в конечном итоге, к доминированию и акцентированию электрона и изменению зарядового состояния центральных ионов; 3) белковый матрикс сохраняет структуру активных центров и обеспечивает возвращение их в исходное состояние; 4) удаление и поступление электронов происходит за счёт туннельного эффекта, а возбуждение, распространяющееся по всей системе комплекса, имеет волновой характер; 5) все процессы должны происходить самосогласованно.

Необходимо особо отметить управляющую роль информации на всех этапах функционирования бионаноконплексов. Рассматриваемые комплексы можно считать информационносодержащими структурами. С термодинамической точки зрения для управления процессами, происходящими в структуре, используется гиббсовская свободная энергия, которая является мерой термодинамической информации, содержащейся в системе. [5] Термодинамическая информация передается от одного элемента структуры к другому и может преобразовываться в другие виды информации.

#### Список литературы

1. Романова Е.Ю., Уварова Л.А. Анализ результатов исследования специфических свойств и квантово-химического моделирования активных центров бионанометаллосодержащих комплексов.// Сб. тезисов четвертой международной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем». – М.: Янус – К, 2019. – 232 с.
2. Васильева Л.Ю., Романова Е.Ю. Бионаноконплексы – нелинейные самоорганизующиеся системы.// Сб. н. тр. «Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем». Вып. 16, Т.2. – М.: Янус – К, 2013. – с. 35-41.
3. Уварова Л.А., Романова Е.Ю. Специфические свойства ферментативных металлосодержащих бионаносистем и математическое моделирование происходящих в них процессов возбуждения.// Сб. н. тр. «Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем» Вып. 19, Т.2. – М.: Янус – К, 2018 – с. 124-130.
4. Васильева Л.Ю., Уварова Л.А., Романова Е.Ю. Моделирование мезо- и нанообъектов в различных средах и полях. – Тверь: ООО «Лаборатория деловой графики», 2010. – 201 с.
5. Эвери Д. Теория информации и эволюция: -М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». Институт компьютерных исследований, 2006. – 252 с.

#### References

1. Romanova E.Yu., Uvarova L.A. Analysis of the results of the study of specific properties and quantum chemical modeling of active centers of bionanometallic complexes. // Book of abstracts of the fourth international conference "Modeling of nonlinear processes and systems". – М.: Janus – К, 2019. – 232 p.

2. Vasilyeva L.Yu., Romanova E.Yu. Bionanocomplexes – multilinear self-organizing systems. // Book of abstracts of "Fundamental physical and mathematical problems and modeling of technical and technological systems" № 16, vol.2. – M.: Janus – K, 2013. – pp. 35-41.
3. Uvarova L.A., Romanova E.Yu. Specific properties of enzymatic metal-containing bionanosystems and mathematical modeling of excitation processes occurring in them // Book of abstracts of "Fundamental physical and mathematical problems and modeling of technical and technological systems" № 19, vol.2. - M.: Janus – K, 2018 – pp. 124-130.
4. Vasilyeva L.Yu., Uvarova L.A., Romanova E.Yu. Modeling of meso- and nanoobjects in various media and fields. Tver: Laboratory of Business Graphics LLC, 2010. – 201 p.
5. Avery D. Information theory and evolution: -M. Izhevsk: SIC "Regular and chaotic dynamics". Institute of Computer Research, 2006. – 252 p.

**ПОКАЗАТЕЛИ ЭНТРОПИИ ДЛЯ ФИНАНСОВОГО  
АНАЛИЗА ПРЕДПРИЯТИЯ**  
**ENTROPY INDICATORS FOR CORPORATE FINANCIAL ANALYSIS**

**Т.В. Рыжкова**

РЭУ им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

117997 Российская Федерация, г. Москва, Стремянный пер., 36,  
Тел.: +7 (499) 236-7373. E-mail: RTVHOME@yandex.ru

В работе показатели энтропии были связаны с финансовыми показателями предприятия, объединенными в группы, характеризующие платежеспособность (ликвидность), финансовую устойчивость, оборачиваемость, рентабельность предприятия. Рассмотрена модель дифференциальной энтропии финансового показателя, связанного с доходностью акции (ROC). Проведена максимизация дифференциальной энтропии с помощью стандартных распределений и метрики Кульбаха–Лейблера.

**Ключевые слова:** финансовый контроллинг, вероятностные распределения, энтропия, дифференциальная энтропия.

Соединение методов современного вероятностного моделирования с системным формализованным подходом к описанию структур не только физической природы позволяет использовать энтропийный подход в экономических системах. Изначально, энтропийный вероятностный анализ получил свое развитие в физике, геофизике, биофизике. Так, показатели энтропии, фрактальной обусловленности очагов землетрясений, а именно, размерность Реньи, статистика Херста были использованы при анализе сейсмических событий, заданных временными рядами наблюдений [9]. В настоящее время в новые стохастических модели ценообразования, например, в стандартизованные методики расчета по базовым формулам Ито или Блэка Шоулса, начинают вводить фрактальную статистику Херста, как дополнительный учет меры хаоса.

Преимущество энтропийного подхода в экономико-математическом моделировании заключается в том, что подход не имеет ограничений по двумерным вероятностным характеристикам распределений, необходимым в регрессионном анализе, корреляционном анализе, дисперсионном и факторном анализе, применяемым в финансовом менеджменте. Корпоративные сети передачи и приема информации, новые возможности анализа и обработки данных по большим объемам информации позволяют решать две основные информационные задачи: по защите корпоративной информации предприятий и современного анализа информации. В этом случае финансовый контроллинг выполняет четыре главные задачи: планирование; информация; надзор (анализ и контроль), управление и предоставляет в распоряжение предприятия систему планов и правил, с помощью которых оно постепенно может двигаться к запланированным целям.

Автором в рамках энтропийного подхода для финансового анализа ранее была описана модель экономической системы - предприятия с подсистемами: подсистема-производство (Производство), подсистема - трудовые ресурсы (Труд), финансовая подсистема [7]. Показатели энтропии были связаны с финансовыми показателями предприятия, объединенными в группы, характеризующие платежеспособность (ликвидность), финансовую устойчивость, оборачиваемость, рентабельность предприятия.

Таким образом, случайный вектор  $\bar{X}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)$  задает энтропийную оценку априорной неопределенности финансовой привлекательности компании [7, 8].

В таблице 1 определены компоненты этого случайного вектора и формулы расчетов.

**Таблица 1. Вероятностные характеристики**

<i>N</i>	<i>Характеристика случайной величины</i>	<i>Расчет</i>
$X_1$	безразмерная случайная величина со значениями, равными коэффициенту покрытия (current ratio)	отношение оборотных активов к текущим обязательствам
$X_2$	безразмерная случайная величина со значениями, равными коэффициенту финансового рычага	отношение собственного капитала к итогу баланса
$X_3$	безразмерная случайная величина, обозначаемая обычно ROA (return on assets)	отношение прибыли к итогу баланса
$X_4$	безразмерная случайная величина, называемая оборачиваемостью компании	отношение выручки компании к итогу баланса
$X_5$	безразмерная случайная величина со значениями, равными доходности акции компании (ROC)	$x_5 = r_i = \frac{S_i - S_{i-1}}{S_{i-1}},$ <p><math>r_i</math> - доходность акции за <math>i</math> день;  <math>S_{i-1}</math> - цена акции при закрытии на <math>i-1</math> день;  <math>S_i</math> - цена акции при закрытии на <math>i</math>- день.</p>

Дополнительно отметим, что показатель  $X_4$  характеризует эффективность использования капитала компании. Когда значение показателя  $X_4$  превышает единицу, т.е. выручка превышает итог баланса, а это означает, что компания эффективно работает, хорошо использует свой капитал и даже выходит на уровень крупнейших международных компаний. Известно, что значение показателя, превышающего 1 присуще нефтяным, нефтегазовым и компаниям с крупной инфраструктурой, а для торговых компаний этот показатель может быть порядка 2.5. Показатель  $X_5$  может служить индикатором рыночной привлекательности компании, для его оценки можно использовать непрерывно начисляемую доходность.

Временные ряды (например, цены акций предприятия) суть реализации случайной величины  $X_5$  со своим видом вероятностного распределения. Случайную величину  $X_5$  можно моделировать непрерывной случайной величиной с функцией плотности вероятности  $p(x)$  и тогда ее дифференциальная энтропия определяется следующим интегралом [5,6]

$$h(X_5) = - \int_S p(x) \log p(x) dx, \quad S - \text{носитель } p(x).$$

Энтропия дискретной случайной величины, связанной с наблюдаемыми значениями, отличается от модельной дифференциальной энтропии на логарифм интервала измерения

$$H(X^\Delta) + \log \Delta \rightarrow h(X).$$

Для построения дифференциальной энтропийной метрики необходимо моделировать функцию плотности вероятности по дискретным значениям финансового показателя  $X_5$ . Так, в [8] для численного анализа были использованы данные финансовой отчетности (агентство «Финам») двух крупных российских компаний при этом значения показателя  $X_5$  были выбраны как недельные котировки акций close ММВБ.

Практически значимым является следующий вопрос. При каких условиях стандартные вероятностные распределения, максимизируют энтропию показателя  $X_5$ ? Тогда значение максимальной энтропии определит наибольший вклад в полную энтропию [8] для случайного вектора  $\bar{X}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ , при фиксированном состоянии экономической системы.

Автором было показано, что известные вероятностные распределения (нормальное, экспоненциальное, логарифмически нормальное), приближенно совпадающие с реальными статистическими по первым двум моментам, ограничивают по энтропии реальные распределения, а именно, их значения энтропии определяют границу значений максимальной энтропии реальной системы. Приведем аналогию из газовой динамики. Известно, что энергия молекул идеального газа имеет экспоненциальное распределение. Условием на систему или «ограничением» системы является то, что неизменным должна оставаться средняя энергия молекул в системе. Таким образом, объясняется, что именно экспоненциальное распределение со своим параметром по среднему значению для энергии обладает свойством максимальной энтропии для такой системы. Следовательно, максимальная энтропия определяет состояние системы при отсутствии новых воздействий, или новых «ограничений» на систему.

Доказаны три утверждения, позволяющие максимизировать дифференциальную энтропию фактического распределения, близкого по параметрам к одному из стандартных распределений, при совпадении соответствующих моментов распределений:

1. Энтропия экспоненциального распределения ограничивает сверху энтропии других распределений при условии равных математических ожиданий (начальных моментов первого порядка).

2. Энтропия нормального распределения ограничивает сверху энтропии других распределений при условии равных дисперсий ( центральных моментов второго порядка).
3. Энтропия логарифмически нормального распределения ограничивает сверху энтропии других распределений при условии равенства их логарифмических моментов первого порядка и центральных моментов второго порядка.

При доказательстве этих утверждений использовалась информационная метрика Кульбаха-Лейбнера [5](коэффициент Кульбаха-Лейбнера), которая характеризует энтропийную меру различия между двумя вероятностными распределениями в форме дифференциальной энтропии.

$$D(p\|f) = \int_S p \log \frac{p}{f}$$

Известно, что этот коэффициент неотрицателен:

$$-D(p\|f) = \int_S p \log \frac{f}{p} \leq \log \int_S p \frac{f}{p} = \log \int_S f \leq \log 1 = 0$$

$$D(p\|f) \geq 0$$

В результирующей таблице 2 приведены формулы для максимизирующих значений дифференциальной энтропии при совпадении моментов изветных вероятностных распределений [8].

**Таблица 2. Максимизирующая энтропия**

<i>Экспоненциальное распределение</i> $\varphi(x) = \lambda \cdot \exp(-\lambda x)$ , $x > 0$ $\lambda = E(X_3)$	<i>Нормальное распределение</i> $\varphi(x) =$ $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right)$	<i>Логнормальное распределение</i> $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln x - a)^2}{2\sigma^2}\right)$
<i>Максимальная энтропия</i> $h(\varphi) = -\ln(m_1) + m_1^2$	$a = E(X_3)$ , $\sigma = \sqrt{DX_3}$	<i>Максимальная энтропия</i> $a = E(\ln X_3)$ , $\sigma = \sqrt{D(\ln X_3)}$
<i>Моменты:</i> $m_1 = \lambda = E(X_3)$	<i>Максимальная энтропия</i> $h(\varphi) = \ln(\sqrt{2\pi}\mu_2) + \frac{1}{2}$	<i>Моменты:</i> $m_1 = E(X_3)$ $\mu_2 = E(X_3 - EX_3)^2 = \sigma^2$
	<i>Моменты:</i> $\mu_2 = E(X_3 - E(X_3))^2 = \sigma^2$	

### Заключение

На практике для оценки конкурентоспособности предприятий применяются методы пороговых значений и балансограмм. А по отклонениям финансовых показателей от пороговых значений экспертным путем делается заключение о состоянии финансовой системы предприятия. Введенные автором индикаторы энтропии финансово-инвестиционной привлекательности могут служить более

целостной мерой оценки неопределенности финансового состояния компании. Энтропийные показатели являются обобщенными количественными характеристиками групп финансовых показателей. Метод оценки финансового состояния предприятия по энтропии может быть использован консалтинговыми компаниями для оценки рисков инвестиционных пакетов вместо оценок, основанных на дисперсии отобранных показателей.

### Список литературы

1. Карлик А.Е., Шухгальтер М.Л. Экономика предприятия. – М. Питер, 2010 – 463с.
2. Ковалева А.М. Финансовый менеджмент.- М. ИНФРА-М, 2009.- 336с.
3. Буренин А.Н. Рынок ценных бумаг и производных финансовых инструментов. М.: НТО им. С. И. Вавилова, 2015. – 420с. Д. Кеннеди. Стохастические финансовые модели. Чапман&Холл / Серия Финансовая математика, Дуглас, 2010. – 264с.
4. Яглом А.М., Яглом И.М. Вероятность и информация. М.: Наука, 1973 – 512с.
5. Мартин Н., Ингленд Дж. Математическая теория энтропий. М.: Мир. 1988 –251с.
6. А. Джимденсе(ст.). Информационная и сигнальная теория – Хьюстон: Райс Университет, 2006. – 98с.
7. Рыжкова Т.В. Энтропийные показатели финансовой системы предприятия // Вестник Станкин, 2012, №2(20), с.124-126.
8. T.V. Ryzhkova. Entropy Economic Model of the Company // IV International Conference “Modeling of Nonlinear Processes and Systems” (MNPS-2019). EPJ Web of Conferences, 2019, 224, 06007. doi.org/10.1051/epjconf/201922406007.
9. Журавлев В.И., Лукк А.А., Сидорин А.А., Рыжкова Т.В. Фрактальные характеристики множеств сейсмических событий при учете фактора времени // Известия - Физика Земли, т.37, вып. 3, Март 2001, с. 223-233.



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ В МОДЕЛИРОВАНИИ МЕЗО- И НАНОСИСТЕМ

Д. М. Силантьев

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

e-mail: [silad.micher@mail.ru](mailto:silad.micher@mail.ru)

Математическая теория катастроф является мощным инструментом для описания сложных систем, включая физические и технические процессы. Она основывается на идее, что небольшие изменения в условиях могут привести к качественным изменениям в поведении системы. Эта теория была успешно применена в различных областях, таких как физика, биология и экономика.

Однако в настоящее время все чаще встречаются мезо- и нанообъекты, такие как наночастицы, нанотрубки и 2D-структуры, для которых описанные методы недостаточно развиты. Обозначенные объекты обладают особенными свойствами и могут быть подвержены влиянию различных физических воздействий, таких как электрические поля, температура и напряжение.

В рамках предстоящей работы предлагается применить математическую теорию катастроф для анализа поведения мезо- и нанообъектов под воздействием внешних факторов. Цель состоит в раскрытии возможностей и ограничений данной теории в контексте этих объектов и процессов, которые в них протекают.

Прежде всего следует рассмотреть типовые катастрофы по Рене Тому. Таковыми являются:

1. Катастрофа типа "Складка":

$$V = x^3 + ax$$

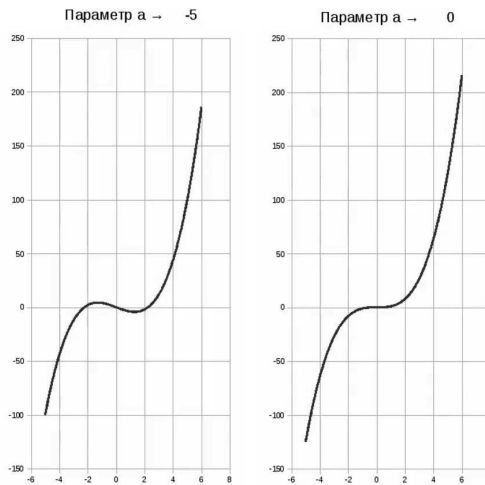


Рис. 1. График катастрофы типа «Складка» при значениях  $a=-5$  и  $a=0$ .

2. Катастрофа типа "Сборка";

$$V = x^4 + ax^2 + bx$$

3. Катастрофа типа "Ласточкин хвост";

$$V = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$$

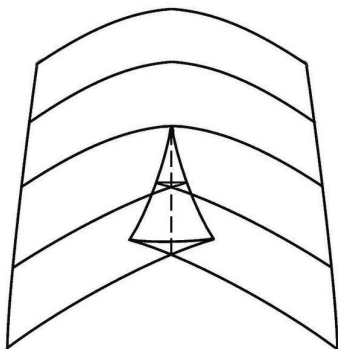


Рис. 2. Поверхность катастрофы «Ласточкин хвост».

4. Катастрофа типа "Бабочка";

$$V = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$$

5. Гиперболическая омбилика;

$$V = x^3 + y^3 + axy + bx + cy$$

6. Эллиптическая омбилика;

$$V = x^3/3 + xy^2 + a(x^2 + y^2) + bx + cy$$

7. Параболическая омбилика.

$$V = yx^2 + y^4 + ax^2 + by^2 + cx + dy$$

В.И. Арнольд, в свою очередь, предложил классификацию катастроф "ADE-классификация":

- A0 — несингулярная точка:

$$V = x$$

- A1 — локальный экстремум: устойчивый минимум или неустойчивый максимум:

$$V = \pm x^2 + ax$$

- A2 — складка
- A3 — сборка
- A4 — ласточкин хвост
- A5 — бабочка

- Ak — бесконечная последовательность форм от одной переменной:

$$V = x^{k+1} + \dots$$

- D4+ — кошелёк = гиперболическая омбилика
- D4- — пирамида = эллиптическая омбилика
- D5 — параболическая омбилика
- Dk — бесконечная последовательность других омбилек
- E6 — символическая омбилика:

$$V = x^3 + y^4 + axy^2 + bxy + cx + dy$$

- E7
- E8

При сравнении классификации Арнольда и Тома можно заметить пересечения.

Для дальнейшего исследования следует рассмотреть примеры использования математической теории катастроф в разных областях, таких как физика, биология, экономика и т.д.

Свой отпечаток вносит и предметная область математического моделирования: физические процессы мезо- и наномасштаба.

Существует уникальное свойство нанотехнологий, связанное с масштабом объектов, который они затрагивают. В масштабе нанометров, когда речь идёт о системах, состоящих, к примеру, из всего десятка молекул, понятие температуры приобретает новое значение и становится трудно сопоставимым с тем, как она воспринимается в том же макро-мире.

Существует необходимость внимательно изучить и анализировать научные исследования в области применения математической теории катастроф в моделировании процессов на наномасштабном уровне.

Особенно важно изучить зарубежные исследования на эту тему, чтобы получить полное представление о том, как эта теория может быть применена и какие результаты уже были достигнуты.

Исследование планирует включать в себя анализ различных типов катастрофических моделей, которые могут быть применимы к мезо- и нанообъектам. Планируется изучение эффекты масштабирования, нелинейности и взаимодействия с окружающей средой.

Кроме того, рассматривается проведение моделирования и анализ различных сценариев воздействия на объекты наномасштаба, чтобы таким образом определить, как они могут вести себя под различными условиями.

Результаты этой работы будут полезны для разработки новых математических моделей, которые могут быть использованы для предсказания поведения мезо- и нанообъектов и для оптимизации их использования в различных технических приложениях.

Это также может привести к новым техническим решениям, связанным с сборкой, управлением и манипулированием таких объектов.

Таким образом, применение математической теории катастроф к мезо- и нанообъектам, находящимся под воздействием, представляет интерес и важность для дальнейшего развития этой области и для решения практических проблем, связанных с этими объектами.

### Список литературы

1. Акимов Валерий Александрович, Диденко Сергей Леонидович Алгебраические основы элементарной теории катастроф для исследования чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. 2019. №4 (62). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algebraicheskie-osnovy-elementarnoy-teorii-katastrof-dlya-issledovaniya-chrezvychaynyh-situatsiy> (дата обращения: 06.12.2023).
2. Арнольд В.И. Теория катастроф. 3-е изд., доп. — М.: Наука, 1990. — 128 с.
3. Наumenко Александр Александрович Применение теории катастроф к анализу технологических систем // Вестник ВГТУ. 2008. №2 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-teorii-katastrof-k-analizu-tehnologicheskikh-sistem> (дата обращения: 06.12.2023).

## КВАЗИКЛАССИЧЕСКИЕ АСИМПТОТИКИ И НЕВЯЗКА ДЛЯ НЕЛОКАЛЬНОГО КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С КУБИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

С.А. Синюков<sup>1</sup>, А.Е. Кулагин<sup>2</sup>, А.В. Шаповалов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, Россия, 634050, Томск, пл. Новособорная, 1,  
Тел.: (3822) 529843, e-mail: [shpv@phys.tsu.ru](mailto:shpv@phys.tsu.ru)

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30,  
Тел.: (3822) 418913, e-mail: [aek8@tpu.ru](mailto:aek8@tpu.ru)

Метод квазиклассически сосредоточенных состояний, основанный на теории роста Маслова является мощным инструментом построения асимптотических решений нелокальных нелинейных уравнений. Метод применялся к ряду уравнений, в частности, эволюционных уравнений типа Шредингера и кинетических уравнений. Поэтому является важной задача исследования невязки и точности данных решений.

В данной работе исследуются свойства невязки асимптотических решений нелокальной модели ионизации активной среды на парах металлов (АСПМ) [1], построенных методом квазиклассически сосредоточенных состояний. Данную модель описывает нелокальное кинетическое уравнение с кубичной нелинейностью следующего вида

$$\begin{aligned} \partial_t u(\vec{x}, t) = D \tilde{D}_a(t) \Delta u(\vec{x}, t) + a(\vec{x}, t) u(\vec{x}, t) \\ - \kappa u(\vec{x}, t) \int_{R^2} d\vec{y} \int_{R^2} d\vec{z} b(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}, t) u(\vec{y}, t) u(\vec{z}, t). \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение (1) описывает двумерное распределение концентрации ионов в активной среде в поперечном сечении газоразрядной трубки (ГРТ) в предположении его однородности вдоль оси ГРТ [3]. Здесь  $u(\vec{x}, t)$  - концентрация ионов; функция  $b(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}, t)$ , где  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z} \in R^2$ , представляет плотность вероятности тройной рекомбинации при столкновении иона с двумя электронами;  $D \tilde{D}_a(t)$  - коэффициент амбиполярной диффузии, где явно выделен асимптотический малый параметр  $D$ ;  $\kappa$  - параметр нелинейности;  $a(\vec{x}, t)$  характеризует кинетический коэффициент процесса ионизации нейтральных атомов. В [2] были построены в явном аналитическом виде семейства асимптотических решений задачи Коши для уравнения (1), которые в классе траекторно-сосредоточенных функций (ТСФ) имеют точность  $O(D^{3/2})$ . Класс ТСФ отвечает функциям, локализованным в  $\sqrt{D}$ -окрестности некоторой траектории  $\vec{x} = \vec{X}(t)$ . В данной работе, используя результаты [2], проводится исследование асимптотических решений, где функции уравнения (1) имеют следующий вид:  $b(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}, t) = b(t) \exp\left\{-\left[(\vec{x} - \vec{y})^2 + (\vec{x} - \vec{z})^2\right] / 2\mu^2\right\}$ ,  $b(t) = B_2 + (B_1 - B_2)e^{-t/\tau_b}$ ;  $\tilde{D}_a(t) = d_1 A e^{-t/\tau_a}$ ;  $a(\vec{x}, t) = a(t) = A e^{-t/\tau_a}$ .

Проведен сравнительный анализ асимптотических и численных решений уравнения АСПМ при одинаковых начальном условии и параметрах модели. Численные решения уравнения строились методом конечных элементов с использованием треугольной сетки.

Сравнение численных и асимптотических решений (рис. 1) показало, что при уменьшении асимптотического параметра диффузии  $D$  асимптотические решения приближаются к численным, что говорит о справедливости асимптотического метода, примененного в [2] в выбранной области значений параметров модели.

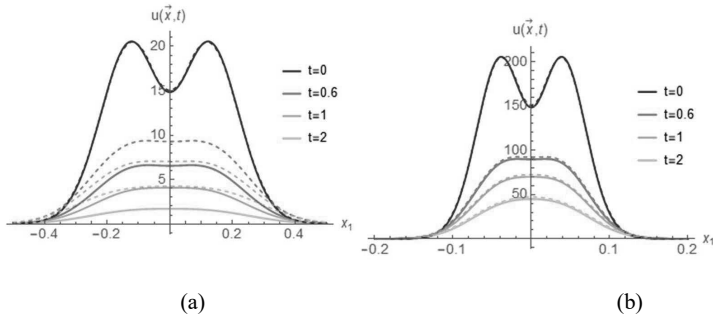


Рис. 2. Асимптотические (сплошные линии) и численные (пунктирные линии) решения уравнения (1) при (a) -  $D=0.01$ , (b) -  $D=0.001$  и  $\vec{x} = (x_1, 0)$ .

Исследование невязки  $g(t, \vec{x}, D)$  продемонстрировало (рис. 2), что в некоторой области достаточно малых значений параметра  $D$  ( $0.001 \leq D \leq 0.02$ ) асимптотическое решение имеет точность  $O(D^{3/2})$ , что согласуется с оценками асимптотических решений, полученных в [2].

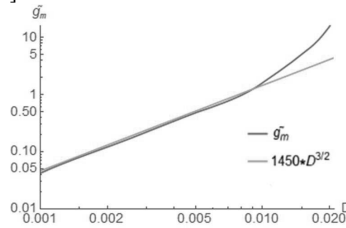


Рис. 2.  $\tilde{g}_m(D) = \max_{t \in [0, 8]} \frac{\|g(t, \vec{x}, D)\|_{L_2}}{\|u(t, \vec{x}, D)\|_{L_2}}$  в Log-Log масштабе при  $D = [0.001, 0.02]$ .

Применение квазиклассического метода для получения асимптотических решений диссипативных задач дает ряд преимуществ. Квазиклассические асимптотики имеют растущую во времени ошибку [4]. Однако для открытых систем с затухающими процессами ошибка будет ограничена сверху, так как невязка убывает, начиная с некоторого момента времени, что проиллюстрировано в работе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-71-01047, <https://rscf.ru/project/23-71-01047/>.

### Список литературы

1. Little C.E. Metal vapor lasers: Physics, Engineering and Applications. – Chichester, UK: John Willey and Sons Ltd., 1998 . P. 620.
2. Shapovalov A.V. Kulagin A.E. Siniukov S.A. Family of asymptotic solutions to the two-dimensional kinetic equation with a nonlocal cubic nonlinearity//*Symmetry*, v. 14, № 6, 2022. P. 577.
3. Carman R.J., Brown D.J.W., A. Piper J.A. A self-consistent model for the discharge kinetics in a high-repetition-rate copper-vapor laser//*IEEE Journal of Quantum Electronics*, v. 30, № 8. 1994, P. 1876–1895.
4. Hagedorn G., Joye A. Semiclassical dynamics with exponentially small error estimates//*Comm. Math. Phys*, v. 207, 1999. P. 439–465.

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКИХ НЕЙРОНОВ

Г.Е. Смышляев, Е.М. Красикова

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»  
127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1,  
2gleb.account@yandex.ru

В настоящее время существует два основных способа моделирования нейронных сетей и создания математических моделей нейронов.

Первый способ предполагает создание искусственных нейронных сетей и соответственно различных моделей искусственных нейронов. Он основан на создании упрощенной модели биологической нейронной сети. Состав такой модели, как правило, представляет из себя набор входных сигналов, каждый из которых имеет свой вес, сумматор весовых значений, функцию активации нейрона и его выходной сигнал.

Второй способ рассматривает биологический нейрон как сложную динамическую систему, учитывая физические и химические процессы, протекающие в биологической нейронной сети при передаче сигнала. Математически такие импульсные модели нейронных сетей (англ. spiking neural networks) представляют собой системы дифференциальных уравнений, в которых учитываются основные параметры биологического нейрона.

Основные модели искусственных нейронов:

1. Модель У. Маккалока и У. Питтса – основная модель современного искусственного нейрона (Рис. 1). Все последующие модели являются различной вариацией сочетания слоев искусственных нейронов представленной модели и связей между этими нейронами.

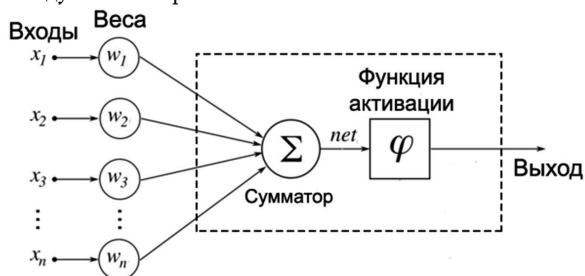


Рис. 1. Модель искусственного нейрона

2. Модель Перцептрона (однослойная ИНС);
3. Модели нейронных сетей со скрытыми слоями нейронов;
4. Сверточные нейронные сети;
5. Рекуррентные нейронные сети;
6. Нейронные сети Хопфилда (сети с обратной связью) и т.д.

Основные динамические модели биологических нейронов:

1. Модель Ижикевича, Данная модель задается в виде системы дифференциальных уравнений:



$$\begin{cases} C_m \frac{dV_m}{dt} = k(V_m - V_r)(V_m - V_i) - U_m + I_b + I_{syn} \\ \frac{dU_m}{dt} = a(b(V_m - V_r) - U_m) \end{cases}$$

если  $V_m \geq V_{peak}$ , то

$$\begin{cases} V_m = c \\ U_m = U_m + d \end{cases}$$

где  $a, b, c, d, k, C_m$  различные параметры нейрона.  $V_m$  — это разность потенциалов на внутренней и внешней стороне мембраны, а  $U_m$  — вспомогательная переменная.  $I$  — это внешний постоянный приложенный ток. В данной модели наблюдаются такие характерные для нейронов свойства как: генерация спайка в ответ на одиночный импульс внешнего тока и генерация последовательности спайков с определённой частотой при подаче на нейрон постоянного внешнего тока.  $I_{syn}$  — сумма синаптических токов от всех нейронов, с которыми связан этот нейрон.

2. Модель Ходжкина–Хаксли. Модель, основанная на ионном транспорте в нейронных клетках была предложена А. Ходжкиным и Э. Хаксли в 1952 году. Данная модель описывается дифференциальными уравнениями первого порядка и имеет вид:

$$\begin{aligned} C \frac{dV}{dt} &= I_{ext} - \bar{g}_K n^4 (V - V_K) - \bar{g}_{Na} m^3 h (V - V_{Na}) - \bar{g}_L (V - V_L), \\ \frac{dx}{dt} &= \alpha_x(V)(1-x) - \beta_x(V)x. \end{aligned}$$

Здесь  $V$  обозначает мембранный потенциал в мВ, отсчитываемый от потенциала покоя; вектор  $x = n, m, h$ , где  $n$  и  $m$  – активационные переменные для калиевых и натриевых каналов,  $h$  – инактивационная переменная натриевых каналов.

3. Модель Хиндмарша–Роуза. Данная модель описывает процесс нейронного бёрстинга. Бёрсты представляют собой группы двух или более спайков, идущих подряд друг за другом и перемежаемых периодами отсутствия активности. Модель Хиндмарша–Роуза представляет собой трехмерную динамическую систему следующего вида:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y - ax^3 + bx^2 + I_{ext} - z, \\ \frac{dy}{dt} &= c - dx^2 - y, \\ \frac{dz}{dt} &= r(s(x - x_1) - z). \end{aligned}$$

Здесь переменная  $x$  описывает мембранный потенциал нейрона, переменные  $y$  и  $z$  соответствуют быстрому и медленному ионным токам, протекающим через мембрану, причём параметр  $r \ll 1$  определяет отношение характерных временных масштабов изменения этих токов. Параметр  $I_{ext}$  описывает внешний ток, подаваемый на нейрон, а остальные параметры характеризуют нелинейность проводимости мембраны. Типичными значениями являются  $a = c = 1, b = 3, d = 5$ , остальные параметры обычно рассматриваются как контрольные и позволяют управлять динамическими режимами системы.

### Список литературы

1. Хайкин, Саймон Нейронные сети:полный курс, 2-е издание. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006 -1104 с. : ил. – Парал. Тит. англ. ISBN 5-8459-0890-6(рус.)
2. А. С. Дмитричев, Д. В. Касаткин, В. В. Клиньшов, С. Ю. Кириллов, О. В. Масленников, Д. С. Щапин, В. И. Некоркин, Нелинейные динамические модели нейронов: Обзор, - Институт прикладной физики РАН, Изв. вузов «ПНД», т. 26, № 4, 2018
3. E.M. Izhikevich, Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting, USA, MA, Cambridge: The MIT Press., 2007

# ПРИЛОЖЕНИЕ К-ЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ В ОПТИЧЕСКОМ И ДНК КОМПЬЮТЕРАХ

## APPLICATION OF K-LOGIC IN OPTICAL AND DNA COMPUTERS

**А.В. Соколов**

**A.V. Sokolov**

MSTU "STANKIN", Moscow, Russia  
127055, Vadkovskii lane, 3a

Tel.: (+7 499)972-42-55, e-mail: sokolovavstankin@yandex.ru

В последние десятилетия технологии вычислений стали объектом интенсивного исследования с целью преодоления ограничений традиционных компьютерных систем. В рамках этого стремления научное сообщество активно исследует новые парадигмы, исходящие из принципов, заложенных природой. Одной из наиболее перспективных областей стала естественная парадигма вычислений, представляющая собой подход к созданию вычислительных систем, вдохновленных механизмами, наблюдаемыми в природе.

Естественная парадигма вычислений основана на стремлении создать вычислительные модели, аналогичные тем, которые проявляются в биологических и физических системах. Этот подход предполагает адаптацию к принципам эволюции, самоорганизации и параллелизма, характерным для природных процессов. Использование естественной парадигмы вычислений открывает новые горизонты для создания более гибких, адаптивных и эффективных вычислительных систем.

В контексте естественной парадигмы вычислений, ДНК-компьютеры представляют собой инновационный класс вычислительных устройств, использующих ДНК как основной материал для хранения и обработки информации. Принципы работы ДНК-компьютеров основаны на молекулярных операциях, таких как слияние и разделение ДНК-цепей, а также использовании биологических механизмов для эмуляции вычислительных процессов. Этот подход позволяет эффективно моделировать сложные биологические явления и является частью более широкого стремления к созданию биоинспирированных технологий [1].

Оптические компьютеры представляют собой инновационный класс вычислительных устройств, использующих свойства света для представления и обработки информации. Развитие оптических компьютеров является ответом на ограничения традиционных электронных вычислительных систем, таких как ограничения в скорости обработки данных и энергопотреблении. Природа световых волн и оптических явлений стали основой для создания более эффективных и быстрых вычислительных устройств, предоставляющих новые горизонты для развития современных информационных технологий.

К-значная логика представляет собой математическую структуру, расширяющую традиционную бинарную логику с двумя значениями (истина/ложь) до системы с  $k$  возможными значениями. В контексте естественной парадигмы вычислений, где стремление к эмуляции сложных процессов природы стоит на первом

плане, k-значная логика предоставляет мощный инструмент для моделирования разнообразных состояний и условий.

Применение многозначной логики, особенно в форме k-значной, в естественной парадигме вычислений обусловлено несколькими ключевыми преимуществами. Во-первых, она позволяет более точно и гибко представлять информацию, учитывая более широкий диапазон значений. Во-вторых, многозначная логика способствует эффективному моделированию неопределенности и вариативности, что согласуется с естественной сложностью биологических систем. Это важно для адекватного отражения реальных условий, где присутствуют нечеткость и множественные варианты ответов.

Актуализация k-значной логики в биологических системах находит широкое применение в решении различных задач. Например, в генетике, k-значная логика может эффективно моделировать уровни экспрессии генов, где каждое значение представляет степень активности гена. Это позволяет учесть не только присутствие или отсутствие экспрессии, но и различные уровни ее проявления. Другим примером может служить моделирование внутриклеточных сигнальных путей, где k-значная логика учитывает множество возможных ответов на внешние стимулы и внутренние перемены.

Применение k-значной логики в контексте ДНК-компьютеров дополняет естественную парадигму вычислений, где ДНК служит основным носителем информации. В этой связи, k-значная логика становится инструментом для эмуляции биологических процессов, таких как генетическая регуляция. Возможность представления не только бинарного кода, но и множества значений в генетической информации, отражает более точное моделирование разнообразия биологических сценариев.

Рассмотрим подход к решению задачи проверки наличия четного числа в последовательности с использованием k-значной логики в ДНК-компьютере. Первым шагом в решении данной задачи является представление последовательности целых чисел в виде ДНК-цепи. Каждое число кодируется уникальной последовательностью нуклеотидов, отражающей его бинарное представление в k-значной логике. Для обозначения четных и нечетных чисел вводится маркер. Например, "А" обозначает четное число, а "В" - нечетное. Этот маркер также представлен в виде уникальной последовательности нуклеотидов. ДНК-компьютер использует многозначную логику для сравнения каждого числа с маркером четности. Если число четное, то k-значная логика реагирует, изменяя соответствующую часть ДНК-цепи (например, добавляется "А"). Если число нечетное, то происходит аналогичное изменение, но с использованием "В". ДНК-компьютер, оснащенный многозначной логикой, начинает обработку каждого числа в последовательности. Если число четное, k-значная логика реагирует, и в соответствующую часть ДНК-цепи добавляется символ "А". В случае нечетного числа аналогичное изменение происходит с использованием символа "В". Это отражает реакцию ДНК-компьютера на четность чисел с учетом многозначной логики.

Таким образом, k-значная логика в ДНК-компьютере предоставляет эффективный механизм обработки числовых данных, адаптированный к особенностям биоинформатики и молекулярных вычислений.

В области оптических компьютеров k-значная логика предоставляет уникальные перспективы для расширения возможностей этих систем. Свойства света, такие как интерференция и фазовая модуляция, могут быть использованы для представления многозначных состояний [2]. Это открывает новые горизонты в создании эффективных

оптических вычислительных устройств, способных обрабатывать информацию с учетом более широкого спектра логических состояний, таких как мультистабильность оптических систем [3].

Рассмотрим задачу нахождения четного числа в последовательности в оптических системах с применением  $k$ -логики. Первый этап решения задачи заключается в преобразовании чисел из последовательности в оптическую форму. Каждое число подвергается оптическому кодированию, где различные параметры, такие как длина волны или фазовая модуляция, представляют значения чисел в  $k$ -значной системе. Оптическая логика в этом контексте основывается на принципах интерференции и фазовой модуляции света. Каждый световой импульс подвергается обработке в соответствии с  $k$ -значной логикой, где различные фазы или характеристики света представляют различные логические состояния. Специальные оптические детекторы фиксируют изменения в световых характеристиках после обработки. Определенные оптические сигналы указывают на четность или нечетность соответствующих последовательностей. Выходные данные оптического компьютера подвергаются тщательному анализу. Присутствие определенных световых импульсов, соответствующих оптическому маркеру, указывает на четность числа. В то время как их отсутствие свидетельствует о нечетности.

Такой метод решения задачи проверки четности чисел в оптическом компьютере, основанный на  $k$ -значной логике, предоставляет инновационный подход к обработке информации. Применение оптических принципов для решения математических задач открывает новые горизонты в области квантовых вычислений и вычислительной оптики, предоставляя высокую эффективность и параллелизм в вычислительных процессах.

Оптический маркер для четности представляет собой световую характеристику, связанную с определенным состоянием поляризации света или другими оптическими параметрами. Этот маркер служит ключевым элементом для дальнейшей обработки и анализа четности чисел.

Активные исследования в области  $k$ -значной логики в рамках ДНК-компьютеров и оптических компьютеров продолжают. Текущие тенденции свидетельствуют о растущем интересе к интеграции многозначной логики в новые технологии. Ожидается, что дальнейшие исследования приведут к разработке более эффективных и адаптивных систем, учитывающих сложность и разнообразие природных процессов.

### Список литературы

1. Г. Паун, Г. Розенберг, А. Саломаа; ДНК-компьютер. Новая парадигма вычислений: - М.: Мир, 2003, 528 с..
2. O.A. Kazakov, A.V. Sokolov, A.A. Pleshkov, L.A. Uvarova Modeling of interaction of electromagnetic waves with metamaterials and nonlinear structures. Monograph. M.: Yanus– K, 2022. ISBN 978-5-8037-0877-3.
3. A.V. Sokolov. Multistability and its application for solving problems. In book: Proceedings of Fifth International Conference "Modeling of nonlinear processes and systems", Moscow, November 16-20, 2020, p. 312.

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ПЕРЕДАЧИ ЗАПАХОВ

К.Э. Сосолятина, А. Ю. Мирончик, В. Р. Николаева,  
Е.А. Девятерикова, Л.А. Уварова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия  
127055, Вадковский пер., 3а  
E-mail: [kristina.sosolyatina@yandex.ru](mailto:kristina.sosolyatina@yandex.ru)

В настоящее время стало актуальным моделирование процессов идентификации и передачи соответствующей информации характеристик, цифровизация которых пока не достигнута в полной мере в отличие от изображения и звука, таких как запах. Актуальность обусловлена рядом причин: общей концепцией цифровизации, более объёмным представлением передаваемой информации, в которой учтены запах и осязание, необходимость в ряде случаев передавать специальную информацию, обеспечение безопасности (например, пожарной) и др.

В настоящее время имеется довольно много достижений в этом направлении, хотя многие фундаментальные проблемы пока не решены. Приведём некоторые примеры имеющихся в мире результатов, полученных в данной области:

- картридж с пробой воздуха проходит обработку в лаборатории, где молекулам природных запахов находят максимально точные пахучие аналоги — восстанавливают запах. Зная химический состав пробы воздуха, можно в лаборатории воспроизвести любой запах того или иного ряда;

- передача текстового сообщения с помощью запаха (университет Йорка, Канада). Текст вводится на плате Arduino Uno в двоичном коде. Затем подключенный к Arduino пульверизатор распыляет пары изопропилового спирта в сторону приемника. Присутствие паров в воздухе соответствует единице, отсутствие — нулю;

- аромат индексируется по двум параметрам: химическому составу и месту в запахе “спектр”, а затем оцифровывается в файл;

- цифровой файл - это запах, прикрепленный к расширенному веб-контенту;

- синтезатор iSmell, действующий по следующему принципу: цифровой код, полученный из Интернета, конвертируется в команды по смешиванию соответствующих ингредиентов, имеющих тот или иной запах;

- воспроизведение запаха после анализа естественного запаха, используя встроенный набор нетоксичных химических веществ;

- электронный нос и другие устройства.

В настоящей работе с использованием базы данных запахов, уравнения переноса проводится цифровизация молекулярных потоков и на их основе и анализе, идентификация запаха. Также рассмотрена передача цифрового запаха с использованием квантовых методов: квантово-классических, классическо-квантовых каналов, квантовой телепортации. Использование квантовых подходов и алгоритмов приводит к более эффективному решению данной задачи.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДНЫХ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПАНИЙ

О.В. Стихова

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский пер., 3а

Тел.: (+7 499)972-42-55, e-mail: [olgitast2011@mail.ru](mailto:olgitast2011@mail.ru)

Математические модели расчета показателей производных промышленных компаний остаются актуальными благодаря своим свойствам многопараметричности. Закономерно, что реальная структура зависимости финансовых активов отличается от гауссовой в условиях рыночных колебаний. В работе рассмотрены модели расчета показателей для рынка производных кредитных инструментов применительно к производителям промышленной продукции. Функции копулы могут быть полезным и простым инструментом для реализации эффективных алгоритмов и более реалистичного моделирования распределения доходности финансовых активов [1].

Важным шагом в моделях калибровки является выбор и калибровка наиболее адекватной функции копулы на основе реальных финансовых данных. Многопараметрическая модель, основанная на обобщенной гиперболической копуле с обобщенными гиперболическими границами (CGH) учитывает различные смешанные распределения и различные распределения граничных областей, сохраняет при этом желаемые свойства одномерного распределения GH[2]. Рассмотрены функциональные характеристики, необходимые для решения задач прогнозирования поведения облигаций, обеспеченных долговыми обязательствами (CDO) и свопов на дефолт по кредиту (CDS) [3]. В работе выделено понятие «производных» от стандартных финансовых активов и рассмотрены способы контроля финансового риска на вторичном рынке обязательств в промышленности. Решена задача математического моделирования поведения риска по траншам производных ценных бумаг. Копулы позволяют нам моделировать структуру зависимости независимо от предельных распределений. Таким образом, мы строим многомерное распределение с различными полями и структурой зависимости, заданной из определенного типа функции копулы [4].

В работе представлены методы калибровки и моделирования функций копулы. Портфель синтетических долговых инструментов составлен по требуемым параметрам. В калибровочных моделях ранние дефолты уменьшают требуемые суммы выплаты траншей капитала с высокими спредами, поздние дефолты - наоборот. При определении цены CDO транша базового портфеля, использована модель вероятности дефолта по множеству эмитентов[4].

$$V_{prot}(0) = E \left[ \begin{array}{c} T - \int_0^T r_u du \\ \int_0^T e^{-\int_0^u r_s ds} N_{T,T} dL_s^{(K_1, K_2)} \\ 0 \end{array} \right]$$

В работе при расчете премиальной части принимаются накопленные выплаты на основании котировок CDS, произведен расчет распределения времени дефолта и для

определения цены CDS основополагающего портфеля использована модель вероятности дефолта по одному эмитенту.

Стоимость защиты определяется размером ожидаемых убытков от дефолта по траншу и стоимость премиальной части транша вычисляется как текущая цена всех ожидаемых выплат по спрэду, где интервал в платежах  $\Delta_i = T_i - T_{i-1}$ :

$$V_{prem}(0) = \sum_{i=1}^M E \left[ e^{-\int_0^{T_i} r_u du} s \Delta_i N_{Tr} \frac{2 - L_{T_{i-1}}^{(K_1, K_2)} - L_{T_i}^{(K_1, K_2)}}{2} \right].$$

Рассмотрены модели расчета риска не возврата кредита по одному эмитенту, с помощью которых оценивается возможность наступления дефолта и выход из дефолта. При доле убытков портфеля  $x \in [0, 1]$  и пороговых значениях дефолта  $K(t) = F_{GH}^{-1}(p(t))$ , где  $p(t)$  нейтральная к риску вероятность дефолта каждого эмитента портфеля, распределение убытков портфеля имеет вид:

$$F_{\infty}(t, x) = 1 - F_{GH_d} \left( \frac{1}{a} \left( K(t) - \sqrt{(1-a^2)} F_{GH_i}^{-1}(x) \right) \right)$$

Для вычисления ожидаемых убытков транша в многопараметрической модели обобщенной гиперболической копулы [5]:

$$EL_{(K_1, K_2)}(t) = \frac{1}{K_2 - K_1} \int_{K_1}^{K_2} (x - K_1) dF_{\infty}(t, x) + (1 - F_{\infty}(t, K_2)).$$

Функции калибровки были также реализованы в области комплексного измерения различных финансовых рисков путем моделирования структуры зависимости между рыночными, кредитными и операционными потерями. В работе проведены вычислительные эксперименты и верификация результатов по моделированию стоимостных показателей продуктов рынка производных кредитных ценных бумаг компаний производственного сектора, обеспеченных долговыми обязательствами и подверженных дефолту, как на искусственно сгенерированных выборках, так и с использованием реальных данных. Функции калибровки реализованы в портфеле из  $n$  финансовых активов, торгуемых на различных мировых фондовых рынках. Рассмотрены индексы iTraxx Европы, Азии, Ближнего Востока и Африки со сроками погашения 3, 5, 7 и 10 лет, новая серия определяется на основе ликвидности каждые шесть месяцев. Базовый индекс iTraxx Europe index включает 125 европейских имен с одинаковым весом по эффективности соответствующих текущих контрактов iTraxx CDS. Методы расчета в данной работе позволяют одновременно моделировать хвостовую зависимость и различные распределения граничных областей. Функции копулы используются для оценки предельного вклада каждого финансового учреждения в системный риск, то есть нестабильность глобальной финансовой системы. Последствия принятия решений для финансовых и промышленных компаний очевидны. Результаты проведенных вычислений, в том числе для предприятий различной сферы деятельности, показали высокую эффективность [7].



### Список литературы

1. Стихова О.В. Математическое моделирование поведения дефолта кредитных деривативов промышленных компаний. / Вестник МГТУ «Станкин». Научный рецензируемый журнал. М.:МГТУ «СТАНКИН», №4(23), 2012, стр.81-84
2. Стихова О.В. Математическое моделирование двойной нормальной обратной копулы гаусса и аппроксимация большого портфеля. «Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем». Ежегодный сборник научных трудов, вып.16. Под ред. Л.А.Уваровой. - М.: «Янус-К», 2014г. стр. 97-102
3. Щетинин Е.Ю, Стихова О.В. Математическое моделирование производных ценных бумаг на дефолт по кредиту на основе моделей копул. / Научно-практический и информационно-аналитический сборник «Финансовая аналитика: проблемы и решения», «Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ», 7(49)-2011,стр.16-25.
4. Stikhova O.V. «Mathematical Estimation Methods and Models for Industrial Companies» EPJ Web of Conferences 248, 03001 (2021) MNPS-2020 <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124803001>.
5. Стихова О.В. Математические методы и модели оценивания для промышленных компаний. / Пятая Международная научная конференция «Моделирование нелинейных процессов и систем». Сборник тезисов. М.:Янус-К, 2021 год, стр.328-329.
6. Стихова О.В. Функции математического моделирования и калибровки для промышленных компаний. / Объединённая международная конференция: «Самарские чтения (в память об Академике А.А. Самарском)» и Пятая Международная научная конференция «Моделирование нелинейных процессов и систем». Сборник тезисов. М.:Янус-К, 2023 год, стр.291-293.

## АВАРИЙНАЯ СИТУАЦИЯ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Н.А. Стукалова<sup>1</sup>, М.А. Смирнова<sup>1</sup>, Г.В. Кошкина<sup>1</sup>, А.А. Гусаров<sup>1</sup>, Д.О. Стукалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия  
170000, Тверь, ул. М. Конева, 12

Тел. (+79105331964), e-mail: [nast77@mail.ru](mailto:nast77@mail.ru)

Техногенные объекты могут быть различной природы – химической, биологической, радиоизотопной и др. В общем случае авария определяется как несанкционированное высвобождение массы или энергии, которое причиняет или способно причинить ущерб реципиенту риска. При этом масса или энергия выступает в качестве источника аварийной опасности. Определение характеристик источника опасности возможно исключительно методами математического моделирования на основе соответствующих математических моделей. Это объясняется тем, что аварийную ситуацию невозможно организовать или повторить. Математическая модель должна адекватно описывать возникновение и развитие источника опасности. Исследование модели позволяет определить условия, при которых эмиссия опасной субстанции возможна, и рассчитать параметры процесса эмиссии.

При разработке модели необходимо решить следующие задачи: проанализировать возможные сценарии развития аварийных ситуаций на химически – опасных объектах, исследовать чрезвычайные ситуации как объект управления, разработать алгоритм расчета последствий при аварийных и чрезвычайных ситуациях, разработать автоматизированную систему расчета параметров аварийных ситуаций для техногенных объектов.

Анализ возможных сценариев аварийных ситуаций показал, что для предотвращения развития возможных аварий в чрезвычайную ситуацию необходимо выполнить следующие действия: при поступлении информации от автоматизированных систем управления технологическим процессом или систем производственно-экологического мониторинга о нарушении технологического режима с возможным выбросом отравляющего вещества в атмосферу должна быть осуществлена оценка сценария развития аварии; по результатам оценки развития аварии и возможности ее перерастания в чрезвычайную ситуацию должно быть принято решение о введении в действие режима чрезвычайной ситуации с привлечением сил и средств чрезвычайного реагирования объекта, а при необходимости сил и средств чрезвычайного реагирования вышестоящей структуры.

Минимизация последствий чрезвычайной ситуации в первую очередь зависит от скорости моделирования процесса распространения облака отравляющего вещества и принятия решений, обеспечивающих ликвидацию возникших аварийных ситуаций.

Все вышеуказанное требует разработки программно-технического комплекса автоматизированной системы поддержки принятия решений.

### Список литературы:

1. Стукалова Н.А., Смирнова М.А., Кошкина Г.В., Гусаров А.А., Семилетова Л.В. Моделирование аварийных ситуаций: в сборнике «Самарские чтения (в память об академике А.А. Самарском)». Материалы международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 232.

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Н.А. Стукалова<sup>1</sup>, Г.В. Кошкина<sup>1</sup>, А.А. Гусаров<sup>1</sup>, Д.О. Стукалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тверской государственной технической университет, Тверь, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия

170000, Тверь, ул. М. Конева, 12

Тел. (+79105331964), e-mail: [nast77@mail.ru](mailto:nast77@mail.ru)

Функционирование опасных химических производственных комплексов и технологических процессов невозможно без соблюдения уровня безопасности и снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Исследование особенностей вредоносных аварийных факторов и разработка эффективных мер по ликвидации возможно на основе использования математического моделирования таких объектов. Принятие решений по управлению ликвидацией чрезвычайной ситуации (ЧС) характеризуется неполнотой и недостоверностью информации о количественных значениях входных и выходных характеристик ЧС, которые являются случайными функциями многих переменных. Математическая модель чрезвычайной ситуации имеет вероятностный характер.

Цель имитационного моделирования состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между ее элементами [1]. Результаты исследования по имитационной модели, как правило, представляют собой оценки значений функциональных характеристик системы. Имитационное моделирование следует рассматривать как статистический эксперимент. В отличие от классических математических моделей, результаты моделирования по которым отражают устойчивое во времени поведение системы, результаты, получаемые в имитационной модели, представляют собой наблюдения, подверженные экспериментальным ошибкам. Это значит, что любое утверждение о величине параметров моделируемой системы, должно основываться на результатах соответствующих статистических проверок.

Успех имитационного моделирования сложных систем непосредственно связан с использованием вычислительных ресурсов, без которых конструктивное использование имитационного подхода невозможно. Многократный «прогон» имитационной модели требует наличия значительных вычислительных ресурсов, которые отсутствуют на техногенных объектах и в региональных подразделениях МЧС. Задача оперативного прогнозирования химической обстановки в условиях ЧС, как многокритериальная задача с большим количеством переменных различных типов либо не будет решена вообще, либо время ее решения будет недопустимым. В качестве средства разрешения этой ситуации предлагается использовать облачные технологии, которые позволяют получить услуги с высоким уровнем доступности и низкими рисками неработоспособности, обеспечить быстрое масштабирование вычислительной системы, без создания, обслуживания и модернизации собственной аппаратной инфраструктуры.

### Список литературы:

1. Стукалова Н.А., Смирнова М.А., Кошкина Г.В., Гусаров А.А., Семилетова Л.В. Моделирование аварийных ситуаций: в сборнике «Самарские чтения (в память об академике А.А. Самарском)». Материалы международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 232.

# ЭПОХА М.В.КЕЛДЫША: ОТКРЫТИЕ «ЦИФРОВОЙ» И «КОСМИЧЕСКОЙ» ЦИВИЛИЗАЦИЙ. К 300-ЛЕТИЮ АКАДЕМИИ НАУК И 70-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН

Т.А.Сушкевич

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия  
e-mail: tamaras@keldysh.ru

Накануне 300-летия Академии наук публикация посвящается академику в 35 лет и самому молодому Президенту Академии наук СССР в 50 лет, единственному математику Трижды Герою Социалистического Труда Мстиславу Всеволодовичу Келдышу – уникальной личности в истории мировой цивилизации и государства российского, которого ещё при жизни называли "Ломоносов XX-го века", "властелин цифры", Главный Теоретик космонавтики, который вместе с Главным Конструктором космонавтики С.П.Королевым 04.10.1957 открыл "космическую эру человечества", покорил космос и основал фундамент для "космической цивилизации", а вместе с А.Н.Тихоновым в 1953 году создали первый в мире Институт прикладной математики АН СССР (Институт Келдыша) и заложили фундаментальные основы "цифровой цивилизации". Впервые в истории 02.12.1946 35-летнего математика назначили руководителем технического Реактивного НИИ, которое занималось проблемами ракетостроения (н. Центр Келдыша), и это был первый шаг на пути к "космической цивилизации". Единственный ученый, именем которого названа "Эпоха Келдыша".

**Ключевые слова:** Институт Келдыша, Эпоха Келдыша, цифровая цивилизация, космическая цивилизация, ЭВМ, прикладная математика, приоритеты

В 2023 году в условиях тектонических геополитических сдвигов глобального порядка в мире и в России и новых геополитических вызовов вплоть до угроз третьей мировой "ядерной" войны вышел Указ Президента Российской Федерации от 31.03.2023 № 229 "Об утверждении Концепции внешней политики Российской Федерации" [1]. Этот Указ фактически является актуализацией приоритетных направлений, целей и задач внешнеполитической деятельности в новых условиях обеспечения суверенитета страны и вызовом для отечественной науки и развития постиндустриального технологического уклада – "цифровой экономики", "цифровой реальности", "цифровой цивилизации", "космической цивилизации" и т.п.

На государственном уровне приняты ключевые директивные документы: Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 № 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации"; Указ Президента Российской Федерации от 15.03.2021 № 143 "О мерах по повышению эффективности государственной научно-технической политики"; Распоряжение Правительства от 20.05.2023 № 1315-р "Концепция технологического развития до 2030 года"; Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 "Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации" [2]; Указ Президента Российской Федерации от 25.04.2022 № 231 "Об объявлении в Российской Федерации Десятилетия

науки и технологий (2022–2031)". Принимаются меры по наращиванию космической группировки (сейчас РФ занимает пятое место, а во времена СССР была лидером) [3].

24 февраля 2023 года "Институт Келдыша" внесен в список санкций США: о новых результатах говорить и писать ограничены, а в современных условиях ВАЖНО вспомнить "ИСТОРИЮ ЗНАНИЙ" и тех, кто эти "ЗНАНИЯ" создавал для фундамента отечественной науки и технологий. Выдающийся ученый и блестящий популяризатор науки академик (03.03.1912) активный организатор в 1925 г. и вице-президент Академии наук СССР Владимир Иванович Вернадский (12.03.1863-06.01.1945) в докладе на тему "Мысли о современном значении истории знаний", прочитанном на первом заседании Комиссии по истории знаний (КИЗ) АН СССР 14.11.26, высказал много умных и полезных мыслей, актуальных и ныне [4, 5]. Важно помнить о преемственности в науке: "История науки является в такие моменты орудием достижения нового", говоря о переломных моментах или острых проблемах в истории государств. Речь идет об "отечественной науке" - её истории и перспективах!

В связи с 70-летним юбилеем «Атомного проекта» в 2019 году Росатом создал и развивает электронную библиотеку "История Росатома. Атомный проект СССР" [6]. По случаю 75-летия Ракетно-космической отрасли в 2021 году появились электронная библиотека с уникальными документами [7] и другие ресурсы [8-10]. Сотрудники архива Академии наук по мере возможностей развивают Информационную систему "Архивы Российской академии наук" [11] и перевели в электронную версию [12] уникальное издание "Персональный состав Академии наук (1724-2009)" в 4-х книгах. Пополняются Летопись Московского университета [13] и "Страницы памяти" Института прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук [14], которые основала Т.А.Сушкевич.

Эти и множество других электронных источников позволяют провести доскональную экспертную работу по установлению главных советских действующих ученых, которым Россия обязана своими успехами в фундаментальных науках и научно-технической сфере. Нас интересует роль Академии наук, первого в мире научного академического Института прикладной математики Академии наук СССР ("Институт Келдыша", АН СССР) [14-19] и Великого русского ГЕНИЯ единственного математика Трижды Героя Социалистического Труда (1956, 1961, 1971) академика Мстислава Всеволодовича Келдыша - его основателя и первого директора (1953-1978) в становлении прикладной математики и открытии "цифровой" и "космической" цивилизаций в России и в мире [20].

Уникальный случай в истории, когда именем ученого названа «Эпоха Келдыша» [21]. В дни празднования 100-летия нашего великого соотечественника М.В.Келдыша в 2011 году нескольким крупным ученым и руководителям Академии наук задали вопрос **"Какие выводы и уроки для нас следуют из эпохи М.В.Келдыша?"**.

**Академик Гурий Иванович Марчук, президент Академии наук с 1986 г. по 1991 г.: *Мы преклоняем голову, когда речь идет об этом выдающемся ученом и президенте Академии наук.*** М.В.Келдыш смог резко увеличить внимание к Академии наук и к фундаментальной науке, он сделал крутой поворот в сторону научного обоснования многих крупнейших проектов, которые в ту эпоху осуществлялись. Прежде всего - в ядерной физике, в космических исследованиях, а также в математических проблемах, которые описывают сложные процессы в этих и других комплексах. Думаю, что его имя еще долго будет для людей **символом того, как**

*нужно бороться за науку, особенно - за фундаментальную науку, и каким образом ее применять.*

**Академик Сергей Михайлович Алдошин, вице-президент РАН:** Насколько я сейчас понимаю историю Академии наук, в разработке как современных видов оружия, так и новых ядерных технологий определяющую роль сыграла Академия наук. *И именно президент Академии наук академик М.В.Келдыш был, как теперь выясняется, основным теоретиком атомной бомбы и водородной бомбы...* Разумеется, мы знаем вклад наших знаменитых академиков Игоря Васильевича Курчатова и Сергея Павловича Королева, но мы не до конца понимали роль президента нашей Академии наук Мстислава Всеволодовича Келдыша. Теперь выясняется, что основную роль играла Академия наук. Она оставалась за кадром, но отвечала за самую суть проблемы – изучение фундаментальных основ, и сейчас понятно, что без этого ничего бы не заработало. Это еще раз говорит о том, насколько важна роль фундаментальной науки.

*Будущее нашей страны в любом случае связано с весомой ролью Академии наук и фундаментальной науки.* Центр тяжести можно смещать куда угодно, можно, например, поставить перед собой задачу и сместить этот центр, как это сейчас делается – в университеты. Через много-много лет, наверное, центр тяжести перейдет туда, но для чего это делать - никто не понимает. Зачем, когда можно развивать центр, который уже существует, который много сделал, который показал, что он может. Пожалуйста, можно и нужно развивать фундаментальную науку в университетах, но имея в виду, что Академия наук всегда с университетами была просто единое целое: фактически все члены Академии наук читают лекции в университетах. Поэтому *искусственное разделение университетов и Академии наук – это очень вредное и опасное явление. И это один из выводов для нас из той эпохи – эпохи Мстислава Всеволодовича Келдыша.*

**Академик Анатолий Иванович Григорьев, вице-президент РАН:** Эпоха Мстислава Всеволодовича Келдыша охватывает значительный период в жизни страны. Это было время зарождения авиации. После окончания МГУ Келдыш работал в ЦАГИ им. Н.Е.Жуковского. Работа требовала умелого сочетания глубоких теоретических исследований с нацеленностью на достижение на их основе прикладных результатов. *Мстислав Всеволодович по складу ума и способностям наилучшим образом отвечал этим требованиям.* Эта, присущая ему, особенность сохранилась у него на всю жизнь. Здесь ему значительно помогало математическое образование. Работая над новыми, ранее неизвестными инженерно-техническими проблемами, М.В.Келдыш формулировал адекватную математическую модель, предлагал методы ее исследования, и на этой основе рождались конструктивные решения.

Позже, решая задачи, связанные с созданием боевых ракет, М.В.Келдыш руководил научными исследованиями по ракетодинамике и прикладной небесной механике и быстро оценил открывающиеся возможности освоения космоса. Огромное значение для развития космонавтики в нашей стране сыграло *творческое содружество двух великих людей той эпохи - М.В.Келдыша и С.П.Королева.* Оба они верили в реальность выхода человечества в космос, обоих отличали высочайший профессионализм и самоотверженный труд. *Их общей заслугой является руководство подготовкой запуска первого Искусственного Спутника Земли, который ознаменовал рождение космической эры.* Вслед за этим достигнутым успехом

наступила очередь первых межпланетных полетов к Луне, Венере и Марсу, полета Ю.А. Гагарина и первых космонавтов.

М.В.Келдыш прекрасно понимал, что полеты человека в космос, работа в космосе и безопасность космонавтов потребуют проведения большого объема медицинских и биологических исследований. Он стал *инициатором создания Института медико-биологических проблем, которому были поручены работы по обеспечению здоровья и медицинской безопасности человека в космосе.* М.В.Келдыш во многом помог Институту в реализации программ медико-биологических исследований в космосе. М.В.Келдыш в полной мере оценил *необходимость объединения международных усилий в освоении космоса и его детищем стал "ИНТЕРКОСМОС". Ему принадлежит заслуга в установлении сотрудничества в этой области с США, Францией и другими странами.*

Говоря о великом ученом М.В.Келдыше, необходимо отметить его выдающуюся организаторскую деятельность, которую он выполнял на посту Президента АН с 1961 по 1975 годы. *Эти годы были венцом его творческой жизни и плодотворным периодом в жизни нашей Академии. Он во многом способствовал авторитету Академии наук,* которая под его руководством решала огромный комплекс современных научных проблем и эффективно использовала свой мощный потенциал для решения практических задач страны.

Каковы уроки для нас? Нужна высокая компетенция, правильный выбор целей и путей развития, ответственность, умение координировать усилия многих людей, организаций и стран при освоении космоса. *Умение мечтать и воплощать свои мечты.* Необходимость защищать авторитет Академии наук, бороться с лжеучениями (как это делал М.В.Келдыш в отношении лысенковщины), быть патриотами своей Родины. *Мы должны воспитывать молодое поколение на примере таких людей, каким был М.В.Келдыш.*

**Академик Валерий Васильевич Козлов, вице-президент РАН:** Мстислав Всеволодович Келдыш - *не просто наша история,* я бы даже сказал – это наша легенда. *Время, когда Мстислав Всеволодович был президентом нашей Академии наук, вероятно, было временем одной из реальных вершин развития науки в нашей стране.* Это было связано, конечно же, не только с тем, что в это время у нас был накоплен огромный научный потенциал, что одновременно работали такие выдающиеся люди, как М.В.Келдыш, М.А.Лаврентьев, Л.И.Седов, я уж не говорю про наших великих соотечественников, таких как С.П.Королев и И.В.Курчатов. А дело как раз в том, что *страна, следуя логике своего развития, поставила перед наукой масштабные, великие задачи – освоение ядерной энергии, создание ядерного щита, а уже как связанные задачи – создание атомной энергетики, и, конечно, ракетно-космическая программа.* Это проблемы, над которыми страна работает и сейчас. Я говорю «связанные задачи», поскольку мы все прекрасно понимаем, что *освоение космоса, запуски космических спутников, запуск человека в космос – это обратная сторона вопросов по развитию оборонного потенциала нашей страны.*

Когда были поставлены такие масштабные задачи, то - поскольку Академия наук всегда была, есть и, надеюсь, будет государственной Академией наук - все научное сопровождение этих великих проблем было поручено Академии наук. *Мстислав Всеволодович Келдыш как раз был лидером Академии наук, нашим лидером в научном сопровождении этих программ...* М.В.Келдыш стал работать по космической программе и его, как мы знаем, называли главным теоретиком космонавтики. Это, конечно, не должность, не официальное название. Официальная

должность была – главный конструктор. Главные конструктора назначались в правительстве, и они образовывали совет главных конструкторов, которым руководил С.П.Королев. А *Мстислав Всеволодович Келдыш – осуществлял теоретическое обеспечение, научное сопровождение всей программы и был членом Совета ГЛАВНЫХ!* ... М.В.Келдыш обладал какой-то магией, которая притягивала людей, создавала исключительно уважительное отношение к Академии наук, к науке в целом, и к нему персонально. Он как бы олицетворял собою науку... *Когда мы вспоминаем эпоху М.В.Келдыша - атомный проект и атомные технологии, космический проект и космические технологии – то понимаем: это дало мощнейший рынок нашей стране.* Следовательно, мы должны продолжать развивать новые технологии. А *их основа – фундаментальные исследования...* М.В.Келдыш очень поддерживал направление, связанное с развитием вычислительной техники, медицинские технологии - в первую очередь, связанные с диагностикой, и, наконец, энергетика... Да, хотелось бы участия Академии наук и всего научного сообщества в решении каких-то масштабных задач, и, мне кажется, это нам было бы по плечу - *вот какие мысли возникают в связи со столетием нашего великого соотечественника.*

Приведу слова из выступления академика Б.Е.Чертока, Героя Социалистического Труда за полет Ю.А.Гагарина, на Торжественном заседании РАН в октябре 2007 года по случаю 50-летия запуска ПЕРВОГО искусственного спутника Земли: *"М.В.Келдыш был истинным лидером нашей науки. Будучи президентом Академии, он вышел далеко за пределы тех прав и возможностей, которые формально государство отдало науке. Он поднимал науку, образованность и тем самым величие страны. Именно такие люди должны руководить страной."*

Речь идет о достижениях отечественной науке за 300 лет. Никто в мире не сделал так много для науки и человеческой цивилизации как М.В.Келдыш [20-24]: *М.В.Келдыш и А.Н.Тихонов* не только обеспечили расчеты для первой в мире «термоядерной бомбы», успешно испытанной в августе 1953 года и до нынешних времен являющейся «сдерживающим фактором» от «мировой ядерной войны», но и заложили *фундамент "цифровой цивилизации"*, а *М.В.Келдыш и С.П.Королев открыли "космическую эру человечества"* [25-28] и заложили *фундамент "космической цивилизации"*. Такой эпохальный вызов был реализован тогда, когда МАТЕМАТИКА стала *"производительной силой"*! Эти две "цивилизации" связаны между собой: покорение и освоение космоса невозможно без математики и расчетов, с одной стороны. А с другой стороны, выход человека в космос явился мощным драйвером для разработки электронно-вычислительных машин (ЭВМ), IT-технологий, Интернет, телекоммуникаций, космической связи, искусственного интеллекта, компьютерной графики и визуализации и т.д., а также основания кибернетики и "вычислительной математики" как самостоятельных разделов математики, развития и внедрения прикладной математики в разные сферы человеческой деятельности. Как свидетель и участник становления этих "цивилизаций" смею утверждать, что именно "космическая цивилизация" оказала наибольшее влияние на становление "цифровой цивилизации". Первые в СССР компьютерные графики и анимацию реализовали сотрудники "Института Келдыша" Т.А.Сушкевич и Ю.М.Бажковский на ЭВМ "Весна" в августе 1964 года [29], используя данные Т.А.Сушкевич математического моделирования прохождения спутников и ракет через радиационные поля Земли, которые были открыты с искусственных спутников Земли в 1957-1959 гг. [30, 31].



В 20-м веке выдающиеся математики-философы А.А.Фридман [32] – ученик В.А.Стеклова, академики В.И.Вернадский [33-40] и Н.Н.Моисеев – "Человек и ноосфера", 1990 [41], "Судьба цивилизации. Путь Разума", 2000 [42] - верили безоговорочно в разум человека и строили теорию ноосферы, которую в 21-м веке продолжил А.М.Тарко [43, 44]. Однако, формирование "информационного общества" исследовалось в последние десятилетия всесторонне, но никто из теоретиков и философов не предсказывал "цифровую" и "космическую" цивилизации, основы которых закладывались в середине 20-го века, но взрывной характер их формирования в масштабах планеты проявился после 2008 года, когда произошел мировой финансовый кризис и всё чаще стали возникать "ракетно-космические" военные конфликты. В последние годы уделяется всё больше внимания проблемам "цифровой" цивилизации за рубежом в связи с новой "Эпохой надзорного капитализма" [45], а в России эти проблемы пока удел ученых [46, 47] и энтузиастов [48], которые под руководством профессора Г.Г.Малинецкого из "Института Келдыша" вместе с Институтом философии РАН проводят международные конференции "Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности" [49].

В 2023 году исполняется 160 лет со дня рождения Владимира Ивановича Вернадского (12.03.1863, Санкт-Петербург, Российская Империя - 06.01.1945, Москва, СССР). В 1881 г. В.И.Вернадский поступил на естественное отделение физико-математического факультета Петербургского университета. Его учителями были крупнейшие русские ученые Д.И.Менделеев, В.В.Докучаев, А.Н.Бекетов, И.М.Сеченов и др. Его специальности: геолог, минералог, кристаллограф, геохимик, историк науки, но в историю он вошел и как философ-естествоиспытатель. Член Петербургской Академии наук, Физико-математическое отделение: с 04.03.1906 – адъюнкт, с 05.04.1908 - экстраординарный академик, с 03.03.1912 - ординарный академик. Президент Академии наук Украины (1918-1919).

В.И.Вернадский является основоположником современного учения о биосфере. По мнению ученого биосфера под влиянием научных достижений и человеческого труда постепенно переходит в новое состояние - ноосферу - сферу разума. Идеи Вернадского о ноосфере, представляющие крупное философское обобщение, возникли на стыке двух основных направлений его научной деятельности - биогеохимии и истории наук. Последней Вернадский уделял особое внимание, указывая, что в моменты взрыва научного творчества, научно-технической революции "**научная мысль является орудием достижения нового**". В 1944 г. В.И.Вернадский в своей последней статье "Несколько слов о ноосфере" [37] подчёркивал, что 20 век является периодом ломки коренных естественнонаучных представлений. Тому подтверждение – открытие в 20 веке "цифровой" и "космической" цивилизаций как важнейших элементов ноосферы, о которой ученые начали говорить в середине 20-х годов 20 века!

Н.Н.Моисеев (23.08.1917-29.02.2000) в проблемной монографии [41], изданной в 1990 г. ещё в СССР, писал: XX век оказался веком коренной ломки наших обычных представлений, приведших к фантастическому взлету техники, а также росту производительных сил. Радио, телевидение, вычислительная техника, выход в космос, приручение ядерной энергии, гениальная инженерия, пластиковые материалы – все эти технические новшества неузнаваемо изменили нашу жизнь, предоставили такие блага, о которых и не могли мечтать... В своей последней книге [42], изданной в 2000 г., с тремя разделами: Логика Природы, Логика истории, Картина мира – Н.Н.Моисеев поставил ключевые вопросы, на которые никто не знал ответа: описал перспективы

развития ноосферы – биосферы и разума, но не дождался признания наступления "цифровой" и "космической" цивилизаций, хотя и как декан факультета управления и прикладной математики МФТИ и как зам. директора ВЦ им. А.А.Дородницына РАН, в котором была разработана первая в СССР система искусственного интеллекта для противоракетной обороны (ПРО), хорошо был осведомлен о состоянии в этих сферах знаний и технологий:

«Около 20 лет тому назад я впервые употребил выражение: "XX век - это век предупреждения". Нынешний век - не просто эпохальный век в истории человечества. Это некоторый рубеж, отделяющий более или менее благополучную историю рода людского от неизвестного и, вероятнее всего, очень опасного для наших общих судеб. Не только России, но и всего планетарного сообщества.

XX век - это вызов, вызов не только истории, но и всему процессу становления вида homo sapiens, пути антропогенеза, который я всегда называл путем "восхождения к Разуму". Станет ли наступающий век очередной ступенью на этом пути, какие он даст ответы на этот вызов?

Но ответы будут, и скоро: время стремительно ускоряет свой бег. Вот почему мне и хочется называть наступающий век "веком свершений".

Каким будут ответы на вызов "века предупреждения"? Вряд ли кто-либо может сегодня дать на этот вопрос более или менее вразумительный ответ.

Об этом я много размышлял последние четверть века и, проведя множество компьютерных экспериментов, убедился в огромных потенциальных возможностях человеческой активности. ***Разум - общечеловеческий Разум - действительно вторгается в стихию самоорганизации, которая до сего времени властвовала на планете.***

Но пойдет ли человечество по пути Разума? Ответ на этот вопрос и есть главный ответ на вызов "века предупреждения".»

А.М.Тарко [44]: Понятие "ноосфера" - одно из наиболее важных для понимания развития человечества и биосферы. Сам термин ввел французский ученый Ле Руа в 1927 году, который трактовал ее как "мыслящую" оболочку, формирующуюся человеческим сознанием. После него академики В.И.Вернадский и Н.Н.Моисеев определяли ноосферу как вполне конкретное понятие. В.И.Вернадский - как сферу разума, важнейшим свойством которой является ответственность за будущее биосферы. Н.Н.Моисеев развил это понятие, соединив его с современной жизнью, направлением развития биосферы и общества, дополнив идеей бифуркационной гибели человечества. Оба были глубоко обеспокоены судьбой планеты и мировой цивилизации, многократно предупреждали об опасностях. Однако, после исчезновения СССР в 1991 году миром правят глобалисты-финансисты и неведанные "глубинные государства", которые не озабочены спасением человечества, напротив, ставят своей задачей сократить население Земли и провоцируют новые войны...

"Цифровая" и "космическая" цивилизации – это рукотворные системы развития человечества, когда ведущую роль сыграли МАТЕМАТИКА и КОСМОС. А в этих сферах СССР создал такой научный потенциал с помощью ВЕЛИКОЙ Академии наук СССР (1925-1991 гг.) и лучшей в мире системы всеобщего и высшего образования, что был ПЕРВЫМ в космосе и ЛИДЕРОМ в области МАТЕМИКИ [50, 51].

В рамках публикации нет возможности изложить историю развития математики и покорения космоса, потому автор предпочла представить список публикаций, которые позволяют получить объективное знание о достижениях отечественной науки.

Прежде всего нужно знать, что с 1925 по 1991 гг. в СССР ни одно стратегическое или ключевое решение не принималось без мнения ученых и АН СССР! Математике придавалось особое значение ещё с Петровских времен, когда по его заказу была подготовлена в 1703 году "Арифметика" Магницкого [52] и среди первых членов Академии наук были приглашены иностранные ученые – математики: Л.Эйлер и пять братьев Бернулли. Академик М.В.Остроградский был первым отечественным математиком, признанным в мировой математике [53]. Первую математическую школу создал в Петербурге академик П.Л.Чебышев в середине 19-го века [54]. Параллельно в Нижнем Новгороде была сформирована научная школа Н.И.Лобачевским, который не был членом Академии наук. В конце 19-го века академик Н.Н.Лузин основал московскую научную школу. Самым выдающимся математиком в начале 20-го века являлся В.А.Стеклов – основатель и первый директор первого Физико-математического института [19, 55]. П.Л.Чебышев активно развивал "прикладную математику" и даже изобрел свой "арифмометр". Однако ПЕРВЫЕ лекции по приближенным вычислениям – учебное пособие в мире подготовил и опубликовал академик А.Н.Крылов – первый Герой Социалистического Труда среди математиков, который первый из математиков занялся приложениями математики к кораблестроению [56-60].

О признании важного значения математики свидетельствует основание в 1936 году журнала "Успехи математических наук" [61]. С.С.Демидов [62]: В этом году исполняется 70 лет со дня выхода первого выпуска "Успехов математических наук". Его биография в значительной своей части – история Советской математической школы. 30-е годы – время ее формирования. В 1934 г. в Москву из Ленинграда переезжает Президиум Академии наук СССР и вместе с ним только что получивший самостоятельность Математический институт имени В.А.Стеклова, бывший до этого частью Физико-математического института Академии наук. Этим актом завершалась длительная конфронтация двух ведущих отечественных математических школ – Петербургской-Ленинградской, основанной П.Л.Чебышёвым, и Московской, из которой в 10-е – 20-е годы выросла школа теории функций Д.Ф.Егорова – Н. Н. Лузина. Вчерашние оппоненты были вынуждены жить вместе. Их совместными усилиями и было создано то ядро, вокруг которого и сложилась одна из ведущих математических школ XX века [62].

28 октября 1947 г. в докладе на Юбилейной сессии Отделения физико-математических наук Академии Наук СССР, посвященной 30-летию Великой Октябрьской социалистической революции, академик М.А.Лаврентьев подвел итоги советской математики [50]: "За прошедшие 30 лет советская математика проделала огромный путь. Советская математика сейчас охватывает все основные направления современной математики. Во многих разделах Советский Союз занял **первое место в мировой математике**... Если до революции и в течение многих лет после революции высшим арбитром ценности результата, значимости того или иного направления считалось мнение иностранных ученых, то теперь этим **арбитром являемся мы сами**... Если по основным разделам математики к 30-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции мы можем рапортовать: **мы догнали, а во многих разделах и перегнали зарубежную математику, то в отношении машинной математики нам нужно еще много усилий, чтобы решить эту задачу. Вычислительная ячейка, созданная в 1935 г. в Математическом институте им. В.А.Стеклова, начинает выполнять, особенно за последние годы, крупные вычисления. Эта ячейка за 12 лет из двух комнат распространилась на целый этаж и занимает сейчас**

больше половины всей площади Математического института... Мне хочется высказать пожелание, чтобы **решение ОФМН о создании специального Института**, вынесенное более двух лет назад, нашло скорейшее и полное разрешение".

В 1942 году начались работы по "Атомному проекту» и 2 декабря 1946 г. впервые математика - молодого 35-летнего академика М.В.Келдыша, признанного лидера по "прикладной математике", назначили руководителем технического Реактивного НИИ (НИИ-1 МАП) – первый шаг к работам по космосу и внедрению математики в ракетостроение! Параллельно М.В.Келдыш был зам. директора Института математики им. В.А.Стеклова АН СССР, где руководил расчетами для "Атомного проекта". Лекции А.Н.Крылова, переизданные в 1933 году [57], были настольной книгой М.В.Келдыша – подарок с автографом автора ещё с 30-х годов, когда М.В.Келдыш после окончания математического отделения по "чистой математике" физико-технического факультета МГУ работал с 1931 года в ЦАГИ и с помощью математики и расчетов спасал авиацию, за что получил две сталинские премии (1943, 1946). Математики сознают важность расчетов и становления нового направления "вычислительная математика", потому с 1946 года возобновляют издание журнала "Успехи математических наук" и увеличивают количество выпусков в год, а 5-6 выпуск в 1946 году [63] посвятили проблемам расчетов.

Следующим после 1946 года ключевым в судьбе М.В.Келдыша стал 1951 год, когда вышло Постановление Совмина "О работах по РДС-6Т" № 1552-774сс/оп от 09 мая 1951 г. за подпись И.В.Сталина, в котором М.В.Келдыша фактически назначили **"Главным Математиком СССР"** [64]. Обратите внимание на состав математической секции: какие ещё совсем молодые, но уже ВЕЛИКИЕ математики, которые решали судьбу мира на планете! Все заслуженно стали Героями Социалистического Труда. Наступает расцвет "Эпохи М.В.Келдыша", когда "царица всех наук" МАТЕМАТИКА, расчеты и ЭВМ на высшем уровне официально на уровне Совета Министров СССР и лично И.В.Сталина - главы руководства СССР признаны приоритетными:

«1. Разрешить Академии наук СССР (т. Несмеянову):

а) увеличить общий штат Математического института АН СССР на 73 человека сверх установленного лимита АН СССР на 1951 г. (в том числе: заместитель директора института – 1, начальник первого отдела института – 1, административно-управленческий персонал – 3 и младший обслуживающий персонал – 2 человека) с соответствующим увеличением фонда заработной платы;

в) организовать в Математическом институте АН СССР **отдел прикладной математики** со штатом 30 человек в составе двух секторов.

4. Обязать **Первое главное управление** при Совете Министров СССР (т. Ванникова, Завенягина) организовать в составе **Научно-технического совета математическую секцию (секцию № 7) для научного руководства по разработке конструкций, быстродействующих вычислительных машин, а также методов их эксплуатации** в составе:

академик Келдыш М.В.	—	председатель секции
академик Петровский И.Г.	—	член секции
академик Соболев С.Л.	—	- " -
член-корреспондент АН СССР Боголюбов Н.Н.	—	- " -

член-корреспондент АН СССР Тихонов А.Н.	—	- " -
академик Лаврентьев М.А.	—	член секции (по вопросам вычислительных машин)
член-корреспондент АН СССР Лебедев С.А.	—	- " -
инженер Базилевский Ю.Я.	—	- " -
инженер Лесечко М.А.	—	- " -

(Прим. автора: Базилевский Ю.Я. и Лесечко М.А. из СКБ-245 – разработчики первой промышленной ЭВМ "Стрела".)

Возложить на секцию № 7 рассмотрение планов научно-исследовательских, экспериментальных и проектных работ, а также проектов математических машин и планов работ организаций, выполняющих расчетные работы по тематике Первого главного управления при Совете Министров СССР.

**5. Распространить на расчетные бюро Математического института и Геофизического института АН СССР, а также на отдел прикладной математики Математического института АН СССР ставки и должностные оклады применительно к ставкам и окладам расчетного бюро Лаборатории измерительных приборов АН СССР.»**

Успехи М.В.Келдыша и его коллективов были столь впечатляющими, что началась борьба разных ведомств за М.В.Келдыша при организации или института прикладной математики или вычислительного центра при Первом Главном Управлении (ПГУ). **Благодаря деятельности МИАН советская математика уже занимала одно из первых мест в мировой науке.** Руководители АН СССР и ученые категорически возражали против изъятия указанной группы математиков из системы АН.

Решение о создании "Института Келдыша" принимало Отделение физико-математических наук АН СССР (ОФМН) и руководство СССР его поддержало. Вскоре по законам естественного развития науки и прогресса как объективная необходимость при наличие подготовленных кадров в соответствии с Распоряжением Совета Министров СССР от 18 апреля 1953 г. № 611-рс и Распоряжением Президиума Академии наук СССР от 27 апреля 1953 г. № 0012002 был создан специальный Институт как Отделение прикладной математики Математического института им. В.А.Стеклова АН СССР (ОПМ МИАН СССР), чтобы не делить Институт Стеклова. Всю необходимую для ПГУ работу в области математических вычислений АН могла провести без разрушения МИАН. Решающим было мнение М.В.Келдыша (42 лет) и победы ученые АН СССР и МАТЕМАТИКА – после длительных согласований, чтобы не разрушать МИАН, для выполнения "Трех проектов" на основе "новых технологий" (чистая и прикладная математика, расчеты, ЭВМ) в 1953 г. было принято историческое стратегическое решение [15] – важнейший шаг к открытию "цифровой" и "космической" цивилизаций:

«Распоряжение СМ СССР № 6111-рс об образовании Отделения прикладной математики Математического института АН СССР, г. Москва. Кремль, 18.04.1953. Сов. секретно (рассекречено):

1. Образовать в Математическом институте им. В.А.Стеклова Академии наук СССР Отделение прикладной математики на базе расчетно-математических бюро, руководимых академиками Петровским и Келдышем, и вычислительного бюро Геофизического института, руководимого чл.-кор. Академии наук СССР Тихоновым.

3. Назначить директором Отделения прикладной математики Математического института им. В.А.Стеклова Академии наук СССР, на правах директора института, акад. Келдыша М.В. и заместителем директора – чл.-кор. Академии наук СССР Тихонова А.Н., освободив его от работы в Геофизическом институте Академии наук СССР.

4. Обязать Первое Главное управление при Совете Министров СССР (т. Завенягина) передать Академии наук СССР для Отделения прикладной математики Математического института им. В.А. Стеклова:

а) бывшее здание Физического института Академии наук СССР по 3-й Миусской улице в г. Москве с имеющимся оборудованием по состоянию на 1 апреля 1953 г., а также наличный состав работников расчетно-математических бюро;»

ГЛАВНЫМИ ГЕРОЯМИ безоговорочно являются Мстислав Всеволодович Келдыш - первый директор ПЕРВОГО в мире Института прикладной математики и его заместитель Андрей Николаевич Тихонов, которые объединили работы на ЭВМ по космическим и атомным проектам в одном коллективе. В 1953-1966 гг. ОПМ МИАН являлся "закрытым" Институтом и достаточно скоро сотрудники и партнеры стали называть его "Институт Келдыша". После смерти С.П.Королева в 1966 году ОПМ МИАН АН СССР получил открытое название "Институт прикладной математики АН СССР", а после смерти М.В.Келдыша в 1978 году присвоили "имени М.В.Келдыша".

В военные и первые послевоенные годы многие выдающиеся российские ученые, основной специальностью которых была теоретическая математика, интенсивно занимались прикладными проблемами науки и техники, требовавшими серьезного математического обоснования и практического решения. В основном эти проблемы были связаны с безопасностью страны, поэтому выполнялись по закрытым каналам. Естественно, такие работы оставались неизвестными широкому кругу специалистов, а между тем в них нередко содержались результаты, опережавшие результаты многих западных исследований. Особенно это относилось к разностным методам приближенного решения задач естествознания (физики, механики и др.). В послевоенные годы возникла острая необходимость в опубликовании в открытой печати таких работ, однако специализированного журнала по вычислительной и прикладной математике у нас не было. Лишь некоторые статьи появлялись в различных сборниках, трудах научных учреждений, а также в единственном существовавшем в то время в СССР математическом журнале "Прикладная математика и механика", который из-за небольшого объема и специфичности математики не мог опубликовать фундаментальные работы по вычислительной математике и математической физике. Кроме того, основной тематикой этого журнала всегда была механика (и лишь частично – математическая физика). Таким образом, *многие исследования по вычислительной математике, созданные в военные годы, оставались неопубликованными, и наша страна теряла приоритеты во многих прикладных областях науки. Немало важных результатов советских ученых, полученных в военные годы, "переоткрывалось" в западных странах.* Эти обстоятельства заставили наших выдающихся математиков поднять вопрос о создании специализированного научного журнала. В первых же выпусках Журнала вычислительной математики и математической физики за 1961 г. стали публиковаться работы по разностным методам решения задач математической физики (А.Н.Тихонова, А.А.Самарского, С.К.Годунова и др.), которые заложили основу будущей знаменитой советской школы в этой области [65-67].

**14 февраля 1954 года в кабинете М.В.Келдыша - директора ОПМ МИАН СССР - прошло ПЕРВОЕ совещание по искусственному спутнику Земли (ИСЗ) –** смотрите статью В.А.Сарычева [68]. В соответствии с Постановлением ЦК КПСС и Правительства СССР "Об увековечивании памяти академика М.В.Келдыша" в июле 1978 года создан и функционирует "Мемориальный кабинет-музей академика М.В.Келдыша при Президиуме РАН". В этом совещании участвовали ученики М.В.Келдыша - будущие академики, а пока кандидаты физико-математических наук Тимур Магометович Энеев и Дмитрий Евгеньевич Охочимский, ставший Героем Социалистического Труда за достижения в космосе и полет Ю.А.Гагарина, а также В.А.Егоров, В.А.Сарычев. На это совещание были приглашены С.П.Королев, П.Л.Капица, Л.И.Седов, С.Э.Хайкин, И.А.Кибель, М.К.Тихонравов, Г.Ю.Максимов, И.М.Яцунский, А.Ю.Ишлинский, С.Н.Вернов и целый ряд других специалистов. Это были те, кто был непосредственно связан с созданием космической техники, и те, кто мог высказать предложения по научным исследованиям, которые нужно было бы проводить со спутников. На совещании обсуждались примерные сроки и технические вопросы запуска первого искусственного спутника Земли, научные проблемы, которые предполагалось решить с помощью аппаратуры на искусственных спутниках. Кроме состава научных экспериментов обсуждался также вопрос об ориентации спутника: запускать ли неориентированный спутник или следует разрабатывать достаточно долго функционирующую систему ориентации.

В 1954 году М.В.Келдышем, С.П.Королевым и М.К.Тихонравовым было представлено письмо в ЦК КПСС и Совет Министров с предложением о создании и запуске искусственного спутника Земли. Правительство поддержало эту инициативу. Однако, потребовалось обоснование для столь масштабных и дорогих проектов...

М.В.Келдыш - ИДЕОЛОГ и ОРГАНИЗАТОР космических исследований. По его указанию летом 1955 года из Академии наук СССР разослали письма ученым разных специальностей с одним вопросом: **"Как можно использовать космос?"** Это же было время мечтателей и большим спросом пользовались книги о фантастике. Мнений и предложений было много и разных. Для убеждения руководителей СССР в необходимости освоения космического пространства и запуска космических спутников и кораблей М.В.Келдыш как государственный деятель выделил **две главные задачи: разведка и наблюдения Земли**. ЭТИ ЗАДАЧИ не только АКТУАЛЬНЫ и в настоящее время – без них уже не мыслим современной жизни. Вокруг них сформировались многие научно-исследовательские программы, проекты, научные и инженерно-конструкторские кадры, коллективы и т.д., а в итоге были созданы отечественные ракетно-космическая отрасль промышленности и ракетно-космические войска. В 1955 году основано Министерство общего машиностроения, курирующее космическую отрасль, и началось строительство космодрома Байконур.

В ноябре 1955 года из АН СССР в ЦК КПСС и Совет Министров было направлено письмо с программой космических исследований. Так зародилось новое научное направление "REMOTE SENSING" или аэрокосмическое дистанционное зондирование Земли - важнейшая основа космических исследований и наблюдений. Между СССР и США БЫЛ ДОСТИГНУТ ПАРИТЕТ по межконтинентальным баллистическим ракетам и остро стояла проблема разработки и создания ПРО (противоракетной обороны) в трех средах (наземная, подводная, космическая). М.В.Келдыш предложил концепцию УПРЕЖДЕНИЯ СТАРТОВ РАКЕТ из КОСМОСА. Этот фантастический проект стал драйвером для развития наук о Земле и космическом пространстве для покорения и освоения космоса и до сих пор актуален и является

мощным сдерживающим фактором для мировых войн. Не случайно уже более 50 стран "присутствуют" в космосе, а "космическими услугами" пользуются все жители мира.

Для расширения исследований в науках о Земле в 1955 году Институт геофизики АН СССР разделили на три академических института: Институт физики атмосферы АН СССР - имени А.М.Обухова с 1994 года, Институт физики земли АН СССР имени Г.А.Гамбурцева с 2004 года вошел в состав Объединённого института физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН, Институт прикладной геофизики АН СССР имени Е.К.Федорова.

Как Главный Теоретик космонавтики М.В.Келдыш отвечал за космические исследования, которые были поручены Академии наук СССР, и для обеспечения запуска ПЕРВОГО в мире Искусственного спутника Земли, который неоднократно обсуждался в Президиуме ЦК КПСС и Совмине [7-10], была создана Комиссия при АН СССР во главе с М.В.Келдышем в соответствии с Постановлением Совета Министров СССР "О создании объекта "Д"" № 149-88с от 30 января 1956 г. [69]:

"В целях наиболее полного использования возможностей объекта "Д" обязать Академию наук СССР (гг. Несмеянова, Топчиева) организовать при Президиуме Академии наук СССР **Комиссию по осуществлению научного руководства при создании объекта "Д" во главе с академиком Келдышем** и с участием ведущих ученых." С.П.Королев и М.К.Тихонравов – заместители М.В.Келдыша.

Ключевым организационным решением по консолидации научных организаций и специалистов в области космических исследований послужило постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 10 декабря 1959 г. № 1388-618 о создании Межведомственного научно-технического совета по космическим исследованиям (МНТС по КИ) при АН СССР (открытое название - Совет № 1), председателем которого был назначен академик М.В.Келдыш (академик-секретарь Отделения математики АН СССР и директор Института прикладной математики (ИПМ) АН СССР) в статусе Министра СССР (и воинское звание генерал) [70] и другие нормативные документы [7-10, 71, 72]. По инициативе и при активном личном участии М.В.Келдыша вышло академическое издание трудов С.П.Королева [73]. М.В.Келдыш с 1939 года был чрезмерно засекреченным, о чем написал ученый секретарь "Института Келдыша" Н.Н.Ченцов [74], который много сделал для создания Музея-кабинета (был первым директором) и издания трудов М.В.Келдыша. В списке литературы и на "странице памяти" [75] представлены труды М.В.Келдыша и другие публикации, свидетельствующие о его роли в становлении "прикладной математики" и покорении космоса [76-93].

XXI-й век – это век супервычислений, суперкомпьютеров и big data (искусственный интеллект) или, как уже признано не только философами, век "цифровой цивилизации". "Человек цифровой цивилизации" – это формирование нового типа смысловой ментальности человека современной информационной цивилизации в условиях достаточно резкого изменения многих привычных стереотипов, которые до этого времени казались неизблемыми; это формирование нового типа коммуникативного пространства; это формирование нового типа человеческого сознания. "Цифровая цивилизация" как современный этап развития информационного общества предполагает новые уровни развития науки, техники, технологий, общества, культуры, экономики, права и образования.

Фундаментальные основы "цифровой цивилизации" были заложены при реализации "Трех проектов" – "Атомный проект", "Космический проект", проект



создания "Ракетно-ядерного щита", которые в "Институте Келдыша" выполнялись с помощью математики и электронных вычислительных машин (ЭВМ). Физики поначалу к ЭВМ отнеслись скептически, – быть может, не скептически, но не были уверены, получают они какие-нибудь результаты или нет. Не верили, что из этой затеи что-то может получиться. М.В. Келдыш же очень верил и настаивал на том, чтобы все считали на машинах. Он с самого начала поверил в вычислительную технику, а физики отмахивались и с ними большую работу проводил лично М.В.Келдыш [18, 19].

С именем Мстислава Всеволодовича Келдыша связаны два фундаментальных события, которые открыли "цифровую" и "космическую" цивилизации не только в СССР, но и в мировых и планетарных масштабах. Главный Конструктор космонавтики С.П.Королев и Главный Теоретик космонавтики М.В.Келдыш осуществили запуск первого в истории человечества искусственного спутника Земли 4 октября 1957 года – это было открытие космической эры и "космической цивилизации". 30 ноября 1946 года в возрасте 35 лет, как Л.Эйлер и А.Н.Колмогоров, М.В.Келдыш был избран академиком в Отделении технических наук АН СССР по специальности "механика, математика" и стал признанным лидером по "прикладной математике". А 2 декабря 1946 года при поддержке И.В.Сталина молодого математика М.В.Келдыша назначают руководителем технического института (1946-1961) – Реактивного НИИ (НИИ-1 МАП), ныне "Центр Келдыша", – это был первый шаг к покорению космоса. РНИИ является преемником ГИРД (Группа изучения реактивного движения), с которой в 1931 году началась история отечественного ракетостроения и Реактивного НИИ. Ракетостроению в России более 90 лет, потому так успешны наши современные ракетостроители.

12 апреля 1961 года ВПЕРВЫЕ человек на космическом корабле пролетел над Землей и это был советский гражданин Юрий Гагарин - СССР совершил очередной эпохальный прорыв ЦИВИЛИЗАЦИИ и был впереди планеты всей! Стало очевидно: кто владеет космосом, тот правит миром! США не могли смириться со своим поражением и началась "гонка" с угрозой "ядерной войны" - США и СССР уже создали "ядерные бомбы" и баллистические ракеты дальнего действия как средства доставки.

12.09.1962 президент Джон Ф. Кеннеди произносит свою знаменитую "Лунную речь" в Хьюстоне, Техас: "...мы стремимся покорить космос просто потому, что он есть. Вселенная, Солнечная система, Луна - это неизведанный мир, который дарит нам надежду на новые знания и благополучие. Мы отправляемся в далекий путь, и да хранит нас Господь, ведь это опаснейшее и величайшее путешествие в истории человечества." За этими миролюбивыми словами, обращенными к населению США, скрывалась истинная новая политика начала "гонки в космосе"!

**Советский ответ возглавил единственный математик** Трижды Герой Социалистического Труда (1956, 1961, 1971) академик М.В.Келдыш как Президент АН СССР (1961-1975), Председатель МНТС по Ки при РАН (1959-1978) в статусе министра и генерала, Главный Теоретик космонавтики, Главный Математик страны (1946, 1951), который разберется в любой технической проблеме (И.М.Виноградов). 19.05.1961 в возрасте 50 лет М.В.Келдыша избрали Президентом Академии наук СССР! М.В.Келдыш - **самый молодой и ПЕРВЫЙ МАТЕМАТИК Президент АН!**

Творческая жизнь и руководящая деятельность М.В.Келдыша пришлась на советскую эпоху, когда во главе страны стояли И.В.Сталин, Н.С.Хрущев, Л.И.Брежнев - они такие разные, но в УЧЕНЫХ и РУКОВОДИТЕЛЯХ науки и промышленности всегда прежде всего ценили ПРОФЕССИОНАЛИЗМ и СПОСОБНОСТЬ при принятии решения брать на себя ОТВЕТСТВЕННОСТЬ! М.В.Келдыш имел высочайший

авторитет в государстве и отвечал за науку и космические исследования. В советское время без ученых и Академии наук стратегические решения не принимались!

"Цифровизация" библиотек и документов, в том числе рассекреченных, позволяет не только получить доступ к отечественному наследию в разных сферах, но и проводить исследования истории научно-технических достижений, отдавая дань памяти и благодарность тем, кто обеспечил высокий уровень науки и образования и безопасность страны.

В 1947 году И.В.Сталин поручил М.В.Келдышу заняться разработкой "больших математических счетных машин". Уже в 1948 году были приняты ключевые меры. Датой начала отсчета основания ИНФОРМАТИКИ и истории вычислительной техники следует считать 17 декабря 1948 г., когда вышло Постановление Совета Министров СССР № 4663-1829, согласно которому было образовано Специальное конструкторское бюро № 245 (СКБ-245) при московском заводе САМ. Задачей СКБ-245 стала разработка и обеспечение изготовления средств вычислительной техники для систем управления оборонными объектами. Именно здесь были созданы первые серийные ламповые машины "Стрела", "Полёт", "Оператор", серии специальных тренажеров, первые машины М-20, "Урал-1", "Погода", "Кристалл", М-205, М-206.

Институт точной механики и вычислительной техники АН СССР был образован для создания в СССР новых средств вычислительной техники, в первую очередь - быстродействующей вычислительной машины (тогда еще не существовало термина суперЭВМ). Постановление Совета Министров ССР № 2369 о формировании нового института в составе Академии наук СССР датировано 29 июня 1948 года.

Создание Института Келдыша (1953 год) произошло через 229 лет после основания Академии наук (1724 год) – результат длинного пути научно-технического прогресса и настало время **МАТЕМАТИКИ как производительной силы**. Это было грандиозное стратегическое решение, определившее достижения и научно-техническое развитие СССР на длительную перспективу, которое заложило основы "цифровой цивилизации" в России! Успехи и достижения математиков достойно прозвучали на Международном Конгрессе математиков в августе 1966 года в Москве [51]. Становление программирования и вычислений на ЭВМ представлено в публикациях [94-109].

### **Заключение.**

26.10.2023 на площадке ракетно-космической корпорации "Энергия" в подмосковном Королёве В.В.Путин провел совещание по вопросам развития космической отрасли [3]. Роскосмос, ЦНИИМаш и др. приступили к активному развитию и реализации Государственных Программ космических наблюдений и глобального мониторинга и дистанционного зондирования Земли, включая Проекты "Сфера", "Грифон", "Цифровая Земля", к участию в которых приглашаются Китай, Индия и страны Азии, Африки, Латинской Америки, а также все заинтересованные научные, коммерческие и бизнес-структуры.

Ещё в 1955 году для обоснования необходимости создания ракетно-космической отрасли великий русский гений М.В.Келдыш как государственный деятель и Главный Теоретик космонавтики выбрал ДВЕ ГЛАВНЫЕ ЗАДАЧИ: НАБЛЮДЕНИЕ ЗЕМЛИ И РАЗВЕДКА ИЗ КОСМОСА. Эти задачи актуальны всегда. К ним добавились ещё связь и интернет. Может, свершится мечта К.Я.Кондратьева и пионеров покорения космоса о "спутниковой климатологии" с целью спасения жизни на Земле! Огромное поле

творчества для отечественных ученых, которые могут возглавить "спутниковую климатологию" в масштабах планеты и опять стать ПЕРВЫМИ!

"Цифровизация" – это инструмент! Фундаментом "цифровой цивилизации" являются два главных фундаментальных направления в науке – физика и прикладная математика (в современном широком толковании), на которых держатся современные высокие технологии. "Космическая" и "цифровая" цивилизации – современные драйверы высокотехнологичных областей, индустриализации и экономического развития во многих сферах человеческой деятельности! Необходимо обеспечить суверенитет и безопасность страны с учетом угроз "надзорного капитализма" [45].

Г.Г.Малинецкий: В настоящее время компьютерный проект в мире и в России обычно рассматривается как экономический, технологический или военный. Вместе с тем, это глобальный социальный проект. Из теории гуманитарно-технологической революции следует, что в нынешней точке бифуркации его результаты могут определить путь человечества в будущее. Неудачный опыт массового электронного образования лишь подтверждает императив Норберта Винера "Отдайте же человеку – человеческое, а вычислительной машине – машинное". В этом и должна, по-видимому, заключаться разумная линия поведения при организации совместных действий людей и машин.

#### Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 31.03.2023 № 229 "Об утверждении Концепции внешней политики Российской Федерации". <http://kremlin.ru/events/president/news/70811>
2. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 "Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации" <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009?index=1>
3. Совещание по вопросам развития космической отрасли, 26.10.2023, Московская область, Королёв, Ракетно-космическая корпорация "Энергия". <http://kremlin.ru/events/president/news/72606>
4. Вернадский В.И. Мысли о современном значении истории знаний. Доклад, прочитанный в I заседании Комиссии по истории знаний 14.XI.26. Л. : Изд-во Академии наук СССР, 1927. 17 с. (Труды Комиссии по истории знаний / Акад. наук СССР). <https://search.rsl.ru/record/01009016798>
5. Вернадский В.И. Избранные труды по истории науки / Архив АН СССР. Институт истории естествознания и техники. Электронный ресурс. <http://www.arran.ru/bookreader/publication.php?guid=644C814A-D9FC-DD26-3B84-C4FFB83BE915&ida=1&kod=9#page/1/mode/1up>
6. Электронная библиотека «История Росатома» <http://elib.biblioatom.ru/> Атомный проект СССР. Электронная библиотека <http://elib.biblioatom.ru/sections/0201/>
7. Ракетные войска стратегического назначения. Справочник. Библиотека РВСН. Документы. Исторические документы: РВСН и ракетостроение (1945-1967). [https://rvsn.info/library\\_main.html](https://rvsn.info/library_main.html); <https://rvsn.info/index.html>
8. Советская космическая инициатива в государственных документах. 1946-1964 гг. / Под ред. Ю.М.Батурина. М.: Издательство «РТСофт», 2008. 416 с. <https://search.rsl.ru/record/01004133883?ysclid=lpnsmx4hm35013959>; [http://www.coldwar.ru/arms\\_race/iniciativa/](http://www.coldwar.ru/arms_race/iniciativa/); <https://djvu.online/file/NNopPhTdo4tst?ysclid=lpnrqy1v2g339839261>; [https://vk.com/wall-209926568\\_230?ysclid=lpnrucibt87821526](https://vk.com/wall-209926568_230?ysclid=lpnrucibt87821526)

9. Батурий Ю.М. Академия наук и космос. К 50-летию полета Ю.А.Гагарина. [https://arran.ru/data/collections/col8\\_.pdf?ysclid=lpkvvvht75345858949](https://arran.ru/data/collections/col8_.pdf?ysclid=lpkvvvht75345858949)
10. Задача особой государственной важности. Из истории создания ракетно-ядерного оружия и Ракетных войск стратегического назначения (1945-1959 гг.) / Сборник документов. Сост. В.И.Ивкин, Г.А.Сухина. М.: Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 2010. 1205 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01004734016?ysclid=lpnscq4rxn434753737;https://djvu.online/file/gh7kDzgQGCEf5?ysclid=lpns9mw8hp143834036>
11. Архивы Российской академии наук. <https://arran.ru/?q=ru/aran>
12. Информационная система «Архивы Российской академии наук». Персональный состав РАН. <https://isaran.ru/?q=welcome;https://www.isaran.ru/?q=ru/persostav>
13. Летопись Московского университета. <http://letopis.msu.ru/>
14. Страницы памяти. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. <https://keldysh.ru/memory/>
15. Распоряжение Совета Министров СССР № 6111-рс Об образовании Отделения прикладной математики Математического института АН СССР от 18 апреля 1953 г. Г. Москва, Кремль. Сов. секретно (рассекречено) // Атомный проект СССР: документы и материалы: В 3 т. / Под общ. ред. Л.Д.Рябева. Федер. агентство по атом. энергии. 1998-2010. Т. 2. Атомная бомба. 1945-1954. Кн. 5. М.-Саров, 2005. С. 542-544. <https://search.rsl.ru/ru/record/01000844024>
16. Попов Ю.П. 50 лет ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. Доклад члена-корреспондента РАН, директора Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН на торжественном заседании, посвященном 50-летию Института, Дом Ученых, 9 октября 2003 года. [https://www.keldysh.ru/grants/rffi/50\\_years/](https://www.keldysh.ru/grants/rffi/50_years/); Институту прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН - 50 лет. М.: ФГУП Изд-во Известия, 2003. 62 с.; <https://search.rsl.ru/ru/record/01002374119;https://keldysh.ru/pages/anniver/introduction/introduction.htm>.
17. Попов Ю.П., Боровин Г.К., Сушкевич Т.А. Институту прикладной математики имени М.В.Келдыша Российской академии наук - 50 лет // Вестник РФФИ. 2004, март, № 1 (35). С. 67-72. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17905955> [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_17905955\\_62261636.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_17905955_62261636.pdf)
18. Келдыш М.В. и его институт. Первое двадцатилетие. М.: Мемориальный кабинет-музей академика М.В. Келдыша, 2001. 56 с. <https://keldysh.ru/httpd/kiam20.pdf>
19. Сушкевич Т.А. Об истоках создания первого института прикладной математики и основ "цифровой цивилизации". Посвящается памяти первого директора М.В.Келдыша и его заместителя А.Н.Тихонова в год 70-летия "Института Келдыша" АН СССР // Суперкомпьютерные дни в России : Труды международной конференции. 25–26 сентября 2023 г., Москва / Под. ред. Вл. В. Воеводина. Москва : МАКС Пресс, 2023. С. 95-109. <https://russianscdays.org/Proceedings>. Презентация доклада [https://russianscdays.org/files/2023/pdf/app4/6\\_Sushkevich.pdf](https://russianscdays.org/files/2023/pdf/app4/6_Sushkevich.pdf)
20. Келдыш М.В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2001. 399 с. 2-е изд. 2002. [http://elib.biblioatom.ru/text/keldysh-tvorcheskiy-portret\\_2002/go,0/](http://elib.biblioatom.ru/text/keldysh-tvorcheskiy-portret_2002/go,0/)
21. Марчук Г.И., Алдошин С.М., Григорьев А.И., Козлов В.В. Эпоха М.В. Келдыша: выводы и уроки. 17 февраля 2011 г. <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=6531c71e-d91f-44a2-bd7e-812a1405cffc>
22. Мстислав Келдыш // «Великие умы России» под ред. В.С.Губарева. Выпуск 2. М.: Издательский дом «Комсомольская правда», 2016. 96 с. <https://avidreaders.ru/book/mstislav-keldysh.html>

23. Губарев В.С. Три звезды Героя: знания и страсти. Несколько страниц из жизни великого ученого нашей Родины М.В. Келдыша // Земля и Вселенная. 2021. № 1. С. 86-100 (начало). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44870432>; Земля и Вселенная. 2021. № 2. С. 79-92 (окончание). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44873285>
24. Сушкевич Т.А. УЧИТЕТЕЛЬ - легенда-математик академик Келдыш Мстислав Всеволодович: уроки НТР в XX-м веке, авиация, космос, атом, математика и компьютеры / Презентация доклада на Международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России», 23-24 сентября 2019 года, Москва. <https://keldysh.ru/memory/keldysh/legend.pdf>
25. Губарев В.С. Русский космос (Сверхдержава. Русский прорыв). М.: АЛГОРИТМ, 2006. 464 с.
26. Маров М.Я. Лидер в космических исследованиях – не по положению, а по призванию. К 110-летию со дня рождения академика М.В.Келдыша // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91. № 2. С. 174-189. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44811429>
27. Сушкевич Т.А. Главный Теоретик М. В. Келдыш и Главный Конструктор космонавтики С. П. Королев – покорители космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 9–25. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=819>
28. Сушкевич Т.А. М.В.Келдыш - организатор международного сотрудничества в космосе и первой советско-американской Программы «Союз-Аполлон» (ЭПАС) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 9-22. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=930>.
29. Сушкевич Т.А. Всемирная глобальная научная Программа «Будущее Земли»: радиационное поле Земли, аэрокосмическое ДЗЗ, компьютеринг, big data (посвящается академику В.В.Воеводину в год его 85-летия) // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции, 23-24 сентября 2019 г., Москва. М.: Издательство ООО «МАКС Пресс», 2019. С. 40-49. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41158083>; <https://2019.russianscdays.org/files/2019/pdf/40.pdf>
30. Масленников М.В., Сигов Ю.С., Сушкевич Т.А. Численное решение задачи о стационарном обтекании тела разреженной плазмой // В сб.: "Тезисы докладов. Четвертое совещание по магнитной гидродинамике", Рига, 22-27 июня 1964 г. - Рига: Изд. АН Латв.ССР, 1964.
31. Масленников М.В., Сигов Ю.С. Дискретная модель вещества в задаче об обтекании тел разреженной плазмой, Докл. АН СССР, 1964, том 159, номер 5, 1013–1016. [https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=dan&paperid=30654&option\\_lang=rus](https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=dan&paperid=30654&option_lang=rus)
32. Фридман А.А. Мир как пространство и время. Серия «Современная культура». Издатель «Academia», 1923. 132 с. (2-е изд. 1965)
33. Электронные версии работ В.И.Вернадского. <http://vernadsky.lib.ru/e-texts/>. Электронный Архив В.И.Вернадского <http://vernadsky.lib.ru/>. Неправительственный экологический фонд имени В.И. Вернадского <http://www.vernadsky.ru/>.
34. Вернадский В.И. Биосфера в космосе. Область жизни. Л.: Научно-техническое издательство, 1926. (Статья о влиянии излучения 1926 год)
35. Вернадский В.И. Биосфера. Л.: Научное химико-техническое издательство – Научно-технический отдел ВСНХ (НХТИ), 1926. 146 с. (Статья о влиянии излучения 1926 год)
36. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера (Биосфера в мировой среде). М.: Наука, 1989. 261с. <https://www.rulit.me/books/biosfera-i-noosfera-read-412871-2.html>;

- <https://avidreaders.ru/book/biosfera-i-noosfera.html>;  
<https://avidreaders.ru/download/biosfera-i-noosfera.html?f=pdf>
37. Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере // Успехи современной биологии. 1944. № 18. Вып. 2. С. 113-120. <http://vernadsky.lib.ru/e-texts/archive/noos.html>
  38. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 261 с. [https://bio.sfu-kras.ru/files/3749\\_vernadsky.pdf](https://bio.sfu-kras.ru/files/3749_vernadsky.pdf); Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера.pdf
  39. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс. 2003. 575 с.
  39. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. Т.10. Собрание сочинений В.И. Вернадского в 24 томах. /vernadsky.ru/elektronnaya-biblioteka/v-i-vernadskij-nauchnaya-mysl-kak-planetnoe-yavlenie
  40. Вернадский В.И. Собрание сочинений в 24 томах. Неправительственный экологический фонд имени В.И.Вернадского. <https://vernadsky.ru/elektronnaya-biblioteka>
  41. Моисеев Н.Н. Человек и ноосфера. М.: Молодая гвардия. 1990. 351 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01001521520?ysclid=lpu091i1ih399057319>;  
[https://vk.com/wall-61771654\\_1465?ysclid=lpu1cesni6164423029](https://vk.com/wall-61771654_1465?ysclid=lpu1cesni6164423029);  
<https://www.litres.ru/book/nikita-moiseev/chelovek-i-noosfera-26336940/chitat-onlayn/?ysclid=lpu00vmz9e350986746>;  
<https://djvu.online/file/qHvtB13OJvaPm?ysclid=lpu061b5e2351434987>
  42. Моисеев Н.Н. Судьба цивилизации. Путь Разума. М.: Языки славянской культуры, 2000. 223 с. <https://s.esrae.ru/noocivil/pdf/2017/8/1734.pdf>
  43. Тарко А.М. О приближении ноосферы // Свободная мысль. Учредители: Политиздат. 2014. № 4 (1646). С. 187-200. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23176666>  
[https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_23176666\\_12970101.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23176666_12970101.pdf)
  44. Тарко А.М. Исследование долгосрочных режимов ноосферы В.И. Вернадского. // Annali d'Italia. Earth Sciences. 2023. № 49. С. 13-36. (Tarko A.M. EARTH SCIENCES INVESTIGATION OF THE LONG-TERM REGIMES OF V.I.VERNADSKY'S NOOSPHERE. DOI: 10.5281/zenodo.10214363) Tarko Noosphere Russ Italia 2023.pdf
  45. Зубофф Шошана. Эпоха надзорного капитализма: битва за человеческое будущее на новых рубежах власти. М.: Издательство Института Гайдара, 2022. 781 с. (Пер. с англ.: Zuboff Shoshana. The Age of surveillance capitalism. New Yorl: Public Affairs, cop. 2019.) <https://search.rsl.ru/ru/record/01010922587>; <https://www.litres.ru/>
  46. Кирсанов К.А., Попова С.А. Цифровая цивилизация // Мировые цивилизации. 2020. Т. 5. №1–2. <https://wcj.world/PDF/10ECMZ120.pdf>; <https://wcj.world/PDF/10ECMZ120.pdf?ysclid=lps5qmn7dq632366680>
  47. Цифровизация и ее место в современном мире [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gd.ru/articles/10334-tsifrovizatsiya>. Что это такое цифровизация простыми словами? <https://www.gd.ru/articles/10334-tsifrovizatsiya>
  48. Ахромеева Т.С., Малинецкий Г.Г., Посашков С.А. Смыслы и ценности цифровой реальности: Будущее. Войны. Синергетика // Философские науки. 2017. № 6. С. 104–120.
  49. Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды 5-й Международной конференции (3-4 февраля 2022 г., Москва) / Под ред. Г.Г.Малинецкого. — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2022. — 292 с. <http://doi.org/10.20948/future-2022> <http://keldysh.ru/future/2022/proc.pdf>
  50. Лаврентьев М.А. Пути развития советской математики // Изв. АН СССР. Сер. матем. 1948. Т. 12, выпуск 4. С. 411–416. Доклад, прочитанный 28 октября 1947 г. на Юбилейной сессии ОФМН Академии Наук СССР, посвященной 30-летию Великой Октябрьской социалистической революции. [http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&irnid=im&paperid=3088&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&irnid=im&paperid=3088&option_lang=rus)

51. Келдыш М.В. Речь на открытии Конгресса // Труды Международного Конгресса математиков. Москва, август 1966 г. М.: Издательство «Мир», 1968. С. 5-6.
52. Магницкий Л.Ф. Арифметика. М.: Синодальная типография, 1703. 662 с. [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_004091683/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004091683/) <https://sovietime.ru/matematika/arifmetika-1703>; arifmetika-magn1703.djvu
53. Пырков В.Е. Михаил Васильевич Остроградский (1801-1861) <http://pyrkov-professor.ru/Default.aspx?tabid=242&ysclid=lpv0kb2obt561600443>
54. Тихонов А.А. Пафнутий Львович Чебышев: человек науки на службе России (к 200-летию со дня рождения) // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22, вып. 3. С. 405-422.
55. Стеклов В.А. Математика и её значение для человечества. Берлин: Гос. Изд-во РСФСР, 1923. 137 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01002578252>
56. Крылов А.Н. Лекции о приближенных вычислениях / Составил А.Н.Крылов, Профессор Николаевской Морской Академии и Института Инженеров Путей Сообщения Императора Александра I. С.-Петербург: Типография Ю.Н.Эрлих (влад. А.Э.Коллинс) М. Дворянская, 19. 1911. 331 с. <http://books.e-heritage.ru/Book/10070444>
57. Крылов А.Н. Лекции о приближенных вычислениях. 2-е изд., значит. доп. и перераб. Л.: Изд-во и тип. Изд-ва АН СССР, 1933. 541 с. (Научно-техническая литература/Акад. наук СССР). <https://search.rsl.ru/ru/record/01009309668?ysclid=lpjj30piio285940079>
58. Крылов А.Н. Мои воспоминания. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1963. 380 с. (1-е изд. 1942. 238 с.; 2-е изд. 1945. 352 с.) Издание в 1963 году в связи со столетним юбилеем со дня рождения А.Н. Крылова, сост. Н.И.Барбашев и С.А.Шерр. <https://search.rsl.ru/ru/record/01006232103?ysclid=lp01ui41o2481611484>; Microsoft Word - Krylov\_Moi\_vospominaniya.doc; [https://ulrgo.ru/upload/iblock/20e/krylov\\_a\\_n\\_moi\\_vospominaniya\\_1.pdf?ysclid=lp01vnqn3h35082898](https://ulrgo.ru/upload/iblock/20e/krylov_a_n_moi_vospominaniya_1.pdf?ysclid=lp01vnqn3h35082898)
59. Чаплыгин С.А. Научная деятельность А.Н.Крылова // Труды Физ.-мат. ин-та им. В.А.Стеклова. Отдел математический. 1934. Т. 5. С. 5-12. (Доклад, читанный на общем собрании Академии Наук 24.XI.1933 в связи с 70-летием А.Н.Крылова) 1933<https://www.mathnet.ru/links/e3a72c4f6619d3029e8a9f64e77387a9/tm861.pdf>
60. Люстерник Л.А. Памяти Алексея Николаевича Крылова (1863–1945) // УМН. 1946. Т. 1, выпуск 1. С. 3-10. <https://www.mathnet.ru/links/fbe7daa209fdf29463f1848f7b9c44f6/rm7009.pdf>
61. Демидов С.С. 70 лет журналу “Успехи математических наук” // УМН. 2006. Т. 61, выпуск 4(370). С. 203–207. [https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=rm&paperid=3273&option\\_lang=rus&ysclid=lpulm9lrga370719255](https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=rm&paperid=3273&option_lang=rus&ysclid=lpulm9lrga370719255); <https://www.mathnet.ru/links/6b002ac3cd912b325086086ebbc17942/rm3273.pdf>
62. Демидов С.С., Токарева Т.А. Формирование Советской математической школы // Исторические математические исследования / Под редакцией С.С.Демидова. М.: Издательство ООО «Янус-К». Вторая серия. 2005. № 10 (45). С. 142–159. <http://pyrkov-professor.ru/default.aspx?ArticleId=85&tabid=195&ysclid=lpu25j3dj1765502923>; <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21276159&ysclid=lpulyzqzgyv608765104>.
63. Успехи математических наук. 1946. Т. 1, № 5-6. (Специальный выпуск по вычислительной математике) [https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?jrnid=rm&wshow=issue&year=1946&volume=1&issue=1&option\\_lang=rus&ysclid=lp019mrkt9138943470](https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?jrnid=rm&wshow=issue&year=1946&volume=1&issue=1&option_lang=rus&ysclid=lp019mrkt9138943470)
64. Постановление СМ СССР "О работах по РДС-6Т" № 1552-774сс/оп. от 09 мая 1951 г. Атомный проект: документы и материалы. Т. 3. Кн. 1. 2008. С. 397-403. Электронная библиотека «История Росатома» <http://elib.biblioatom.ru>. Атомный проект СССР.

- Электронная библиотека <http://elib.biblioatom.ru/sections/0201/>;  
[http://elib.biblioatom.ru/text/atomny-proekt-sssr\\_t3\\_kn1\\_2008/go,396/](http://elib.biblioatom.ru/text/atomny-proekt-sssr_t3_kn1_2008/go,396/)
65. Керимов М.К. К пятидесятилетию «Журнала вычислительной математики и математической физики» // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2012. Т. 52, № 9. С. 1571–1581.  
[https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=zvmmf&paperid=9728&option\\_lang=rus&ysclid=lq23k7gahc825317243](https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=zvmmf&paperid=9728&option_lang=rus&ysclid=lq23k7gahc825317243)
  66. 90-летию Сергея Константиновича Годунова посвящается // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2020. Т. 60, № 4. С. 549–552. <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=vychmat&year=2020&vol=60&iss=4&file=VychMat2004019Vstuplenie.pdf>
  67. Годунов С.К. Воспоминания о разностных схемах. Доклад на Международном симпозиуме «Метод Годунова в газовой динамике». Мичиганский университет (США). Май, 1997. Новосибирск: Научная книга, 1997. 40 с. <https://pdfslide.net/download/link/-5572110b497959fc0b8e3217.html>
  68. Прикладная небесная механика и управление движением / Сборник статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е.Охочимского. Сост.: Т.М.Энеев, М.Ю.Овчинников, А.Р.Голиков. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2010. 368 с. <http://keldysh.ru/memory/okhotsimsky/index.htm>
  69. Постановление Совета Министров СССР № 149-88с «О создании объекта "Д"». План разработки и изготовления объекта «Д», проведения научно-исследовательских работ и эскизной проработки по объекту «Д» от 30 января 1956 г. Совершенно секретно. Особая папка (рассекречено) [https://rvsn.info/library/docs/doc\\_1\\_1072.html](https://rvsn.info/library/docs/doc_1_1072.html)
  70. Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР "О развитии исследований по космическому пространству" от 10 декабря 1959 г. № 1388-618. Совершенно секретно особой важности (рассекречено) <https://www.kosmonavtika.com/bibliographie/documents/1388-618.pdf>  
[http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/history/2\\_9.pdf](http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/history/2_9.pdf)
  71. Постановление Совета Министров СССР «Об утверждении Положения о Межведомственном научно-техническом совете по космическим исследованиям при Академии наук СССР» от 24 сентября 1960 г. № 1026-421 секретно (рассекречено). [http://www.coldwar.ru/arms\\_race/iniciativa/ob-utverzhenii-polozheniya.php](http://www.coldwar.ru/arms_race/iniciativa/ob-utverzhenii-polozheniya.php)
  72. Постановление Совета Министров СССР «О комиссии по пускам космической ракеты объекта «М» № 999-414 9 сентября 1960 г. СОВ.СЕКРЕТНО (рассекречено) [http://www.coldwar.ru/arms\\_race/iniciativa/o-komissii-po-puskam.php](http://www.coldwar.ru/arms_race/iniciativa/o-komissii-po-puskam.php)
  73. Творческое наследие академика Сергея Павловича Королева. Избранные труды и документы / Под ред. М. В. Келдыша. М.: Наука, 1980. 591 с.
  74. Ченцов Н.Н. Всемирно известный, всемерно засекреченный // Наука и жизнь. 1991. № 2. С. 102-107. <http://publ.lib.ru/ARCHIVES/N/>"Nauka\_i\_jizn"\_(jurnal)\_"NiJ\_1990-99\_.html
  75. М.В.Келдыш. Страница памяти. <https://keldysh.ru/memory/keldysh/index.htm>
  76. Келдыш М.В. Избранные труды. Математика. М.: Наука, 1985. 447 с. <http://pyrkov-professor.ru/default.aspx?ArticleId=530&tabid=191>
  77. Келдыш М.В. Избранные труды. Механика. М.: Наука, 1985. 567 с.
  78. Келдыш М.В. Избранные труды. Общие вопросы развития науки. М.: Наука, 1985. 703 с.
  79. Келдыш М.В. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика. М.: Наука, 1988. 493 с.



80. Ченцов Н.Н. М.В.Келдыш – человек и ученый (малоизвестные страницы биографии) // Келдыш М.В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2002. С. 91–102. <https://keldysh.ru/memory/keldysh/chentsov.htm>
81. Келдыш М.В., Маров М.Я. Космические исследования. М.: Наука, 1981. 192 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01001030991?ysclid=lpu2p8vgfe331812441;https://djvu.online/file/WbSjg64qCDof6?ysclid=lpu2rkm870181883168>
82. Келдыш М.В. Сила творческого гения советского народа // Утро космической эры. М.: Госполитиздат, 1961. 764с. С. 187-190. <https://fantlab.ru/edition308961>
83. Келдыш М.В. Десятилетие первого полета человека в космос. Дерзновенный подвиг века. Доклад на Торжественном собрании в Кремлевском Дворце съездов 12 апреля 1971 года // Освоение космического пространства в СССР. По материалам центральной печати 1971 г. / ИКИ АН СССР. Отв. ред. Нариманов Г.С. М.: Издательство «Наука», 1973. С. 20-27. <https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/osvoen-kosm-pr-sssr/1971/01.html>
84. Келдыш М.В. Наука требует героизма // Наука и жизнь. 2001. № 5. <https://www.nkj.ru/archive/articles/5889/>
85. Келдыш М.В. Начинаящим путь в науке // Возраст поколения. М.: Молодая гвардия, 1974; Келдыш М.В. Избранные труды. Общие вопросы развития науки. М.: Наука, 1985; Наука и жизнь. 2001. № 5. <https://www.nkj.ru/archive/articles/5890/>
86. Каманин Н.П. Скрытый космос (рукописи "Космические дневники генерала Каманина" в 4-х книгах). [https://booksafe.net/author/kamanin\\_nikolay-9440.html](https://booksafe.net/author/kamanin_nikolay-9440.html)
87. Черток Б.Е. Ракеты и люди (в 4-х книгах). М.: Машиностроение, 1999. [https://booksafe.net/author/chertok\\_boris-17704.html](https://booksafe.net/author/chertok_boris-17704.html)
88. Гагарин Ю.А. Дорога в космос. Записки летчика-космонавта СССР / Лит. запись специальных корреспондентов «Правды» Н.Денисова и С.Борзенко. Под ред. и с пред. генерал-лейтенанта авиации Н.Каманина. М.: Правда, 1961.; М.: Воениздат, 1969. 350 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01007240580?ysclid=lq275mfeli15922250;https://testpilot.ru/ospace/bibl/gagarin/doroga81/dor81-1.html?ysclid=lq27407nk6615035567>
89. Титов Г.С. 700 000 километров в космосе. Рассказ о полете советского космического корабля «Восток-2». М.: Издательство «Правда», 1961. 144 с. [https://search.rsl.ru/ru/record/01006484609?ysclid=lq2795xmuu966074472;https://royallib.com/book/titov\\_german/700000\\_kilometrov\\_v\\_kosmose\\_polnaya\\_versiya\\_s\\_ill.html](https://search.rsl.ru/ru/record/01006484609?ysclid=lq2795xmuu966074472;https://royallib.com/book/titov_german/700000_kilometrov_v_kosmose_polnaya_versiya_s_ill.html). Специальный выпуск. М.: Издательство "Известия", 1961.
90. *4 октября 1957 года начало космической эры. Первая космическая / Сборник статей, посвященных пятидесятилетию юбилею запуска Первого искусственного спутника Земли. М.: ИКИ РАН, «Регион Инвест», 2007. 335 с. [http://www.iki.rssi.ru/books/2007pervaya\\_r.pdf](http://www.iki.rssi.ru/books/2007pervaya_r.pdf)*
91. Освоение космического пространства в СССР. Официальные сообщения ТАСС и материалы центральной печати 1957-1967 гг. // ИКИ АН СССР. Отв. ред. Скуридин Г.А. М.: Издательство «Наука», 1971. 555 с. <https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/osvoen-kosm-pr-sssr/1957-1967/01.html>
92. Освоение космического пространства в СССР. Официальные сообщения ТАСС и материалы центральной печати октябрь 1967 - 1970 гг. // ИКИ АН СССР. Отв. ред. Петров Г.И. М.: Издательство «Наука», 1971. 360 с. <https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/osvoen-kosm-pr-sssr/1968-1970/01.html>
93. Освоение космического пространства в СССР. По материалам центральной печати 1971 г. // ИКИ АН СССР. Отв. ред. Нариманов Г.С. М.: Издательство «Наука», 1973. 302 с. <https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/osvoen-kosm-pr-sssr/1971/01.html>

94. Апендикова Н.Г. О роли М.В.Келдыша в некоторые ключевые моменты становления отечественной вычислительной техники // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 58. 12 с. doi:10.20948/prepr-2017-58 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-58>
95. Шура-Бура М.Р. Мы были на переднем крае. <https://keldysh.ru/memory/shurabura/interview/>
96. Келдыш М.В. Отзыв о научной работе М.Р.Шура-Бура. 19 сентября 1968 г. М.: Страницы памяти ИПМ им. М.В.Келдыша. <https://keldysh.ru/pages/shb80/>; <https://keldysh.ru/pages/shb80/shbr1.htm>
97. Быховский М.Л. Новые американские счетно-аналитические машины // УМН 1947. Т. 2, №2. С.231-234. [https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=rm&paperid=6951&option\\_lang=rus](https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=rm&paperid=6951&option_lang=rus); <https://www.mathnet.ru/links/2934be4fc7015e76ef2101edfd1c34c3/rm6951.pdf>
98. Люстерник Л.А. Механизация численного решения математических задач на счётно-аналитических машинах // УМН. 1946. Т. 1, вып. 5-6. С. 224-227. <https://www.mathnet.ru/links/25b1f91fc18d46acae13be03d5dd3ebe/rm7077.pdf>
99. Люстерник Л.А. Некоторые задачи вычислительной математики // Известия АН СССР, ОТН, 1946, № 8.
100. Люстерник Л.А., Абрамов А.А., Шестаков В.И., Шура-Бура М.Р. Решение математических задач на автоматических цифровых машинах. Программирование для быстродействующих электронных счетных машин / Отв. ред. Л.А.Люстерник. Академия наук СССР, Институт точной механики и вычислительной техники АН СССР. М.: Издательство Академии наук СССР, 1952. 326 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01006004794?ysclid=lp9e6n272172573755>; <http://books.maththree.ru/book/lyusternik> (скачать)
101. Китов А.И., Криницкий Н.А., Комолов П.Н. Элементы программирования (Для электронных цифровых машин) / Отв. ред. А.И.Китов. М.: Издательство Воен. ордена Ленина и ордена Суворова артиллер. инж. акад. им. Ф.Э.Дзержинского (Артиллерийской инженерной академии им. Дзержинского), 1956. 287 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01005884212?ysclid=lp3d4lzh668832072>
102. Китов А.И., Криницкий Н.А. Электронные цифровые машины и программирование: Учебное пособие для вузов. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 572 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01006304299?ysclid=lp3bi669xm675012482> <https://c.fractr.xyz/file/2272373/>
103. Кетков Ю.Л. Школа программирования ИПМ им. М.В.Келдыша: М.Р.Шура-Бура, С.С.Камынин, Э.З.Любимский, В.С.Штаркман, Д.А.Корягин, И.Б.Задыхайло / Доклад на Второй Международной конференции SORUCOM-2011 "Развитие вычислительной техники и ее программного обеспечения в России и странах бывшего СССР", 12-16 сентября 2011 г., Великий Новгород. <https://keldysh.ru/events/ketkov/#1>
104. Электронный архив академика А.П. Ершова <http://ershov-arc.iis.nsk.su/>
105. Ершов А.П., Шура-Бура М.Р. Становление программирования в СССР: Начальное развитие. Новосибирск, 1976. 49 с. (Препр./ АН СССР, Сиб. отд-ние: ВЦ; № 12).
106. Ершов А.П., Шура-Бура М.Р. Становление программирования в СССР: Переход ко второму поколению языков и машин. Новосибирск, 1976. 42 с. (Препр./ АН СССР, Сиб. отд-ние; ВЦ; № 13).
107. Ершов А.П., Шура-Бура М.Р. Пути развития программирования в СССР// Кибернетика. 1976. № 6. С. 141-160.
108. Конференция «Пути развития советского математического машиностроения и приборостроения». Пленарные заседания (132 стр.). Секция универсальных

цифровых машин, часть I (230 стр.), часть II (259 стр.), часть III (180 стр.), Москва, 12-17 марта, 1956 г. Напечатано ВИНТИ по решению оргкомитета конференции.  
<https://search.rsl.ru/ru/record/01008513390?ysclid=lpso2u82t2261549077>

109. Келдыш М.В., Ляпунов А.А., Шура-Бура М.Р. Математические вопросы теории счетных машин (Доклад на Сессии АН СССР по научным проблемам автоматизации производства 15-20 октября 1956 г.) // Вестник АН СССР. 1956. № 11. С. 16-37. В кн.: М.В.Келдыш. Избранные труды. Математика / Отв. Ред. К.И.Бабенко, Н.Н.Боголюбов, Н.Н.Ченцов. М.: Наука, 1985. 448 с. С. 421-442.  
<http://pyrkov-professor.ru/default.aspx?ArticleId=530&tabid=191>

## К ВОПРОСУ О СВЯЗИ ИНФОРМАЦИИ И ЭНЕРГИИ

Л.А. Уварова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Москва, Вадковский пер., д.3а.

[uvar11@yandex.ru](mailto:uvar11@yandex.ru)

В настоящее время вопрос о понятии информации продолжает вызывать много дискуссий, что связано с фундаментальностью этого понятия. Кроме того, её нельзя напрямую связать с массой или энергией, т.к. не выполняются законы сохранения (например, рассказав новый материал ученику, учитель по-прежнему его знает и т.п.), а также и отсутствуют некоторые свойства, характерные для материи. Вместе с тем для передачи информации, как известно, необходим материальный носитель. Поэтому с точки зрения материализма информация – это свойство материи [1], то есть фактически некоторая реализация философской категории «отражение». Одни философы относят это свойство ко всей материи, другие – к самоорганизующейся материи. Также нужно иметь в виду, что соответствующие материальные объекты должны быть измеримыми.

Довольно часто проводят аналогию между энтропией Шеннона для информации и энтропией Больцмана. При этом нужно иметь в виду, что эта аналогия формальна, поскольку вероятности, входящие в энтропию Шеннона, характеризуют, в общем случае, макроскопические состояния. Энтропия Больцмана зависит от числа реальных микросостояний, соответствующих макросостоянию газа [2] и, следовательно, связана с энергией.

Н. Винер писал об информации более конкретно: Винер: движение и действие больших масс или передача и преобразование больших количеств энергии направляется и контролируется при помощи небольших количеств энергии, осуществляющих управление — несущих информацию.

Здесь мы будем опираться на это представление об информации и проведём некоторые расчёты.

Как известно, согласно принципу Лендауэра, стирание одного бита приводит к выделению тепловой энергии  $W=kT\ln 2$ , где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура, при которой находится вычислительная система. В настоящее время информация всего ИНТЕРНЕТА оценивается в  $10^{13}$  Гб. Таким образом, при стирании всей информации при комнатной температуре выделится примерно 224 Дж. Следовательно, либо распространение информации характеризуется КПД, равным практически 1, либо преобразование огромного количества энергии управляется крайне небольшим её количеством, что также свидетельствует об огромной эффективности процесса. Интересно отметить следующее. По различным оценкам плотность эфира составляет  $\rho=8,85*10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>, характерный размер естественной ячейки- ядра нейрона порядка 3-18 мм, она содержит примерно 4,7 бита информации. Тогда кинетическая энергия такой ячейки (при расчёте на 1 бит) при разумной скорости эфирного ветра 100 м/с очень близка к указанной выше тепловой энергии ( $2,8 *10^{21}$  Дж). Таким образом, в

данном случае эфир выступает как полезная физико-математическая модель для исследования связи между энергией и информацией.

#### **Список литературы**

1. Шавенько Н.К. Основы теории информации. Учебное пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2019. – 135 с.
2. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М.: Либроком, 2013- 304 с.

# ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ ПЛОЩАДНОЙ ЗАДАЧИ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ В КОЛЛЕКТОРЕ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРОВОГО ТИПА<sup>2</sup>

Р.М. Узьянбаев<sup>1,4</sup>, Ю.А. Повещенко<sup>2</sup>, В.О. Подрыга<sup>2,3</sup>, С.В. Поляков<sup>2,4</sup>,  
Ю.О. Бобренёва<sup>4</sup>, П.И. Рагимли<sup>2</sup>, И.М. Губайдуллин<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

<sup>2</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия, г. Москва

<sup>3</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Россия, г. Москва

<sup>4</sup>Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН, Россия, г. Уфа

[ravil-11@mail.ru](mailto:ravil-11@mail.ru)

Изучение законов движения жидкостей имеет важное значение в технике и естественности [1]. В последние десятилетия сфера исследования и применения этих явлений значительно расширилась. Данная сфера включает различные области техники и естественных наук. Особенно актуален этот вопрос при решении задач флюидодинамики в нефтегазовой отрасли [2, 3]. Для изучения динамики жидкостей используются как теоретические методы, так и физические эксперименты. Однако моделирование явлений при течении жидкостей в лабораторных условиях затруднено. Проведение физических экспериментов экономически дорого и технически затруднительно [4]. Реальные течения жидкости в коллекторах усложнены геологическими факторами [5], различными фильтрационно-емкостными свойствами пласта. Описывающие их уравнения также имеют сложный характер, где проявляются нелинейность, многомерность, нестационарность и наличие большого количества переменных [6]. Поэтому математическое моделирование играет важную роль в гидродинамических исследованиях.

В работе рассматривается численная реализация математической модели изотермической двухфазной фильтрации жидкости в коллекторе с двойной пористостью в пространственно двумерной постановке. Модель описывает течение флюида к скважине в коллекторе сложного строения [5], который представлен сильно развитой системой естественных трещин. Наличие трещиноватости в поровом коллекторе усложняет процесс течения тем, что обе системы имеют сильно отличающиеся друг от друга фильтрационные характеристики. При этом в процессе течения жидкости происходит обмен флюида между поровой частью и трещинами [3]. Такая модель описывается системой сильно нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных отдельно для воды и нефти. В основе математического описания процессов фильтрации лежат уравнения механики сплошных сред. Движение флюида осуществляется в соответствии с классическим законом Дарси.

$$\frac{\partial(\phi^\alpha \rho_o S_o^\alpha)}{\partial t} + \nabla(\rho_o U_o^\alpha) + q_o^\alpha = \rho_o q_j, \quad q_o^m = -q_o^f = -\rho_o^m \sigma \lambda_o^m (P^f - P^m), \quad (1)$$

---

<sup>2</sup> Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-71-20047.

$$\frac{\partial(\phi^\alpha \rho_w S_w^\alpha)}{\partial t} + \nabla(\rho_w U_w^\alpha) - q_w^\alpha = \rho_w q_j, \quad q_w^m = -q_w^f = -\rho_w^m \sigma \lambda_w^m (P^f - P^m), \quad (2)$$

$$\lambda_o^m = \frac{k^m k_{ro}(S_o^m)}{\mu_o}, \quad \lambda_w^m = \frac{k^m k_{rw}(S_w^m)}{\mu_w}. \quad (3)$$

$$U_o^\alpha = -\frac{k^\alpha k_{ro}(S_o^\alpha)}{\mu_o} \text{grad} P_o^\alpha, \quad U_w^\alpha = -\frac{k^\alpha k_{rw}(S_w^\alpha)}{\mu_w} \text{grad} P_w^\alpha. \quad (4)$$

Здесь  $\alpha = f, m$ , где  $f$  – система естественных трещин,  $m$  – поровая часть коллектора,  $o$  – нефть,  $w$  – вода,  $P^f$  – пластовое давление в сети трещин (Па),  $P^m$  – пластовое давление в поровой части (Па),  $\phi^f$  – пористость в трещинах,  $\phi^m$  – пористость в порах,  $\rho_o$  – плотность нефти (г/м<sup>3</sup>),  $\rho_w$  – плотность воды (г/м<sup>3</sup>),  $S_i^f$  – насыщенность нефти/воды в системе трещин,  $S_i^m$  – насыщенность нефти/воды в поровой части,  $U_i^\alpha$  – скорость течения нефти/воды,  $q_j$  – дебит жидкости (м<sup>3</sup>/сут),  $\sigma$  – коэффициент трещиноватой породы (1/м<sup>2</sup>),  $q_i^\alpha$  – функция перетока между поровой частью и естественными трещинами,  $k^\alpha$  – абсолютная проницаемость (м<sup>2</sup>),  $k_{rw}$ ,  $k_{ro}$  – относительные фазовые проницаемости,  $\mu_o$  – вязкость нефти (Па·с),  $\mu_w$  – вязкость воды (Па·с).

Для задачи задаются следующие начальные и граничные условия:

$$P^m|_{t=0} = P_0, \quad P^f|_{x=0} = P_b, \quad \frac{\partial P^f}{\partial x}|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial P^f}{\partial y}|_{y=0} = \frac{\partial P^f}{\partial y}|_{y=l} = 0. \quad (5)$$

Здесь  $P_0, P_b$  – начальное и забойное давления.

Система уравнений (1)–(4) с учетом условий (5) является сложной системой уравнений математической физики смешанного типа.

Для решения задачи (1)–(5) будут использованы подходы, описанные в работах [7-10], но обобщенные для двумерного случая.

При численном решении используются аппроксимации дифференциальных операторов на декартовой сетке, полученные в рамках метода конечных разностей и схемы расщепления по физическим процессам. Расщепление исходной системы (1)–(4) по физическим процессам предполагает представление ее в таком виде, который позволит реализовать эффективный численный алгоритм и производить расчеты с крупным шагом по времени с меньшим количеством неизвестных параметров. В результате расщепления получаем два блока уравнений: пьезопроводный и относительно переноса насыщенностей.

После линеаризации по модифицированному методу Ньютона и аппроксимации расщепленной системы уравнений (1)–(4) соответствующими конечными разностями аддитивной разностной схемы получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вдоль каждой из осей ( $x$  и  $y$ ) для приращений давлений в трещинах  $\delta P^f$ :

$$-A_{p(kj)}^y \delta P_{(k,j-1)}^f + C_{p(kj)}^y \delta P_{(kj)}^f - B_{p(kj)}^y \delta P_{(k,j+1)}^f = \Phi_{p(kj)}^y, \quad (6)$$

$$-A_{p(k,j)}^x \delta P_{(k-1,j)}^f + C_{p(k,j)}^x \delta P_{(k,j)}^f - B_{p(k,j)}^x \delta P_{(k+1,j)}^f = \Phi_{p(k,j)}^x,$$

где  $k, j$  – индексы разностной сетки вдоль осей  $x, y$ .

Коэффициенты (6) выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} A_{p(k,j)}^x &= \frac{\tau}{\left[ (\rho_w^f)^{(\delta 1f)} \right]_{(k,j)}^\approx} \left\{ \frac{1}{h_{x,(k-\frac{1}{2},j)}} \left( \frac{\rho_w^f k^f}{\mu_w^f} \right)_{(k-\frac{1}{2},j)}^s k_{rw(k-1/2,j)}^{\text{ups}_x} \right\} + \\ &+ \frac{\tau}{\left[ (\rho_o^f)^{(\delta 1f)} \right]_{(k,j)}^\approx} \left\{ \frac{1}{h_{x,(k-\frac{1}{2},j)}} \left( \frac{\rho_o^f k^f}{\mu_o^f} \right)_{(k-\frac{1}{2},j)}^s k_{ro(k-1/2,j)}^{\text{ups}_x} \right\}, \\ B_{p(k,j)}^x &= \frac{\tau}{\left[ (\rho_w^f)^{(\delta 1f)} \right]_{(k,j)}^\approx} \left\{ \frac{1}{h_{x,k+1/2,j}} \left( \frac{\rho_w^f k^f}{\mu_w^f} \right)_{k+1/2,j}^s k_{rw(k+1/2,j)}^{\text{ups}_x} \right\} + \\ &+ \frac{\tau}{\left[ (\rho_o^f)^{(\delta 1f)} \right]_{(k,j)}^\approx} \left\{ \frac{1}{h_{x,k+1/2,j}} \left( \frac{\rho_o^f k^f}{\mu_o^f} \right)_{k+1/2,j}^s k_{ro(k+1/2,j)}^{\text{ups}_x} \right\}, \\ A_{p(k,j)}^y &= \frac{\tau}{\left[ (\rho_w^f)^{(\delta 1f)} \right]_{(k,j)}^\approx} \left\{ \frac{1}{h_{y,(k,j-\frac{1}{2})}} \left( \frac{\rho_w^f k^f}{\mu_w^f} \right)_{(k,j-\frac{1}{2})}^s k_{rw(k,j-1/2)}^{\text{ups}_y} \right\} + \\ &+ \frac{\tau}{\left[ (\rho_o^f)^{(\delta 1f)} \right]_{(k,j)}^\approx} \left\{ \frac{1}{h_{y,(k,j-\frac{1}{2})}} \left( \frac{\rho_o^f k^f}{\mu_o^f} \right)_{(k,j-\frac{1}{2})}^s k_{ro(k,j-1/2)}^{\text{ups}_y} \right\}, \\ B_{p(k,j)}^y &= \frac{\tau}{\left[ (\rho_w^f)^{(\delta 1f)} \right]_{(k,j)}^\approx} \left\{ \frac{1}{h_{y,(k,j+\frac{1}{2})}} \left( \frac{\rho_w^f k^f}{\mu_w^f} \right)_{(k,j+\frac{1}{2})}^s k_{rw(k,j+1/2)}^{\text{ups}_y} \right\} + \\ &+ \frac{\tau}{\left[ (\rho_o^f)^{(\delta 1f)} \right]_{kj}^\approx} \left\{ \frac{1}{h_{y,(k,j+\frac{1}{2})}} \left( \frac{\rho_o^f k^f}{\mu_o^f} \right)_{(k,j+\frac{1}{2})}^s k_{ro(k,j+1/2)}^{\text{ups}_y} \right\}, \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
C_{p(k,j)} = & \frac{(S_w^f)^{(\delta 1f) \approx}}{(\rho_w^f)^{(\delta 1f) \approx}} (\bar{\phi}^f \rho_w^f)_{P_f}^{1s} + \frac{(1 - S_w^f)^{(\delta 1f) \approx}}{(\rho_o^f)^{(\delta 1f) \approx}} (\bar{\phi}^f \rho_o^f)_{P_f}^{1s} + \\
& + \frac{\tau}{[(\rho_w^f)^{(\delta 1f) \approx}]_{(k,j)}} \left\{ \frac{1}{h_{k+\frac{1}{2},j}} \left( \frac{\rho_w^f k^f}{\mu_w^f} \right)_{k+\frac{1}{2},j}^s k_{rw(k+\frac{1}{2},j)}^{ups} + \frac{1}{h_{k-\frac{1}{2},j}} \left( \frac{\rho_w^f k^f}{\mu_w^f} \right)_{k-\frac{1}{2},j}^s k_{rw(k-\frac{1}{2},j)}^{ups} \right\} + \\
& \frac{\tau}{[(\rho_w^f)^{(\delta 1f) \approx}]_{(k,j)}} \left\{ \frac{1}{h_{k,j+\frac{1}{2}}} \left( \frac{\rho_w^f k^f}{\mu_w^f} \right)_{k,j+\frac{1}{2}}^s k_{rw(k,j+\frac{1}{2})}^{ups} + \frac{1}{h_{k,j-\frac{1}{2}}} \left( \frac{\rho_w^f k^f}{\mu_w^f} \right)_{k,j-\frac{1}{2}}^s k_{rw(k,j-\frac{1}{2})}^{ups} \right\} + \\
& + \frac{\tau}{[(\rho_o^f)^{(\delta 1f) \approx}]_{(k,j)}} \left\{ \frac{1}{h_{k+\frac{1}{2},j}} \left( \frac{\rho_o^f k^f}{\mu_o^f} \right)_{k+\frac{1}{2},j}^s k_{ro(k+\frac{1}{2},j)}^{ups} + \frac{1}{h_{k-\frac{1}{2},j}} \left( \frac{\rho_o^f k^f}{\mu_o^f} \right)_{k-\frac{1}{2},j}^s k_{ro(k-\frac{1}{2},j)}^{ups} \right\} + \\
& \frac{\tau}{[(\rho_o^f)^{(\delta 1f) \approx}]_{(k,j)}} \left\{ \frac{1}{h_{k,j+\frac{1}{2}}} \left( \frac{\rho_o^f k^f}{\mu_o^f} \right)_{k,j+\frac{1}{2}}^s k_{ro(k,j+\frac{1}{2})}^{ups} + \frac{1}{h_{k,j-\frac{1}{2}}} \left( \frac{\rho_o^f k^f}{\mu_o^f} \right)_{k,j-\frac{1}{2}}^s k_{ro(k,j-\frac{1}{2})}^{ups} \right\} \\
& + \left\{ \frac{\tau}{[(\rho_w^f)^{(\delta 1f) \approx}]_{(k,j)}} (\rho_w^m \bar{\sigma} \lambda_m^m)^s (1 - \pi_m^s) \right\} + \left\{ \frac{\tau}{[(\rho_o^f)^{(\delta 1f) \approx}]_{(k,j)}} (\rho_o^m \bar{\sigma} \lambda_m^m)^s (1 - \pi_m^s) \right\}.
\end{aligned}$$

Здесь  $k_{rw\Omega}^{ups}$  – относительная фазовая проницаемость воды в ячейке  $\Omega$ , взятая из узла  $\omega(\Omega)$  этой ячейки, расположенного вверх по потоку (up) с невязного временного слоя ( $s$ ). В сеточных аппроксимациях  $a^{\approx}$  значения на невязном временном слое  $\hat{t}$  берутся на  $s + 1$  уже рассчитанной итерации,  $\delta 1$  – вес по времени,  $a'$  – производная по давлению,  $\delta P$  – невязка по давлению. Выражение  $a^{\sim}$  обозначает аппроксимацию сеточной функции  $a$  между слоями по времени  $t$  и  $\hat{t} = t + \tau$ ;  $\tau$  – временной шаг.  $\bar{\phi} = \bar{h}_{xy} \phi$ ,  $\phi$  – пористость в узле, домноженная на пространственный шаг  $\bar{h}_{xy}$ ,  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma} h_{xy}$ ,  $\sigma$  – коэффициент трещиноватой породы, в узле, домноженный на пространственный шаг  $\bar{h}_{xy}$ .  $(k, j)$  – индексация в узлах по  $x$  и  $y$  соответственно,  $(k \pm \frac{1}{2}, j \pm \frac{1}{2})$  – индексация в ячейках по  $x$  и  $y$  соответственно. В коэффициенты  $C_{p(k,j)}^x, C_{p(k,j)}^y$  выделены соответствующие блоки из суммарного диагонального коэффициента  $C_{p(k,j)}$  в соответствии с принципом построения аддитивной разностной схемы. Аналогичным образом в аддитивной разностной схеме определяются невязки  $\Phi_{p(k,j)}^x, \Phi_{p(k,j)}^y$ .

Для решения СЛАУ (6) с трехдиагональной матрицей использовался метод скалярной прогонки. Построенная разностная схема была реализована в виде программного модуля, написанного на языке Си. С помощью численных расчетов построены зависимости давления и насыщенностей по времени и пространству для различных значений проницаемости системы естественных трещин.

### Список литературы

1. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика.-Москва: Недра, 1993.

2. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде.-Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
3. Наказная Л.Г. Фильтрация жидкости и газа в трещиноватых коллекторах.-Москва: Недра, 1972.
4. Райсс Л. Основы разработки трещиноватых коллекторов.-Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012.
5. Nelson N.A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs.-Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001.
6. Кудряшов Н.А. Методы нелинейной математической физики: учебное пособие.-Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010.
7. Bobreneva Yu.O., Rahimly P.I., Poveshchenko Yu.A., Podryga V.O., Enikeeva L.V. On one method of numerical modeling of piezoconductive processes of a two-phase fluid system in a fractured-porous reservoir // Journal of Physics: Conference Series, v. 2131. 2021, 0220021.
8. Uzyanbaev R.M., Poveshchenko Y.M., Podryga V.O., Polyakov S.V., Bobreneva Yu.O., Gubaydullin I.M. Analysis of Parallel Algorithm Efficiency for Numerical Solution of Mass Transfer Problem in Fractured-Porous Reservoir. // In: Voevodin, V., Sobolev, S., Yakobovskiy, M., Shagaliev, R. (eds) Supercomputing. RuSCDays 2022. Lecture Notes in Computer Science. – Cham: Springer, v. 13708. 2022, P. 33-47.
9. Uzyanbaev R.M., Bobreneva Yu.O., Poveshchenko Yu.A., Podryga V.O., Polyakov S.V. Modeling of two-phase fluid flow processes in a fractured-porous type reservoir using parallel computations. // L. Sokolinsky and M. Zymbler (Eds.): PCT 2022, CCIS, v.1618. 2022, P. 276-292.
10. Bobreneva Yu.O., Poveshchenko Yu.A., Podryga V.O., Polyakov S.V., Uzyanbaev R.M., Rahimly P.I., Mazitov A.A., Gubaydullin I.M. One Approach to Numerical Modeling of the Heat and Mass Transfers of Two-Phase Fluids in Fractured-Porous Reservoirs. // Mathematics, v.11, №18. 2023, P. 3991 (16 p.).

**ЭМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССА УНИФИКАЦИИ КАДРОВ  
ДАНЫХ ПРОТОКОЛОВ ZIGBEE И WIRELESSHART  
ПО МЕТОДИКЕ «ПОСРЕДНИКИ»**

**Юсеф Фарах**

«МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский пер., 3а

Тел.: (+7 999)226-68-96, почта: [farahjyousef@gmail.com](mailto:farahjyousef@gmail.com)

**EMULATION OF THE PROCESS OF UNIFYING DATA FRAMES OF  
THE ZIGBEE AND WIRELESSHART PROTOCOLS USING THE  
"INTERMEDIARY" METHOD**

Farah Yousef

MSTU "STANKIN", Moscow, Russia

127055, Vadkovskii lane, 3a

Tel.: (+7 999)226-68-96, e-mail: [farahjyousef@gmail.com](mailto:farahjyousef@gmail.com)

**Аннотация.** Разработан программный эмулятор, в качестве программной реализации предложенного теоретического решения (методика посредника) вопроса интероперабельности стандартов беспроводных сенсорных сетей. Эмулятор обеспечивает унификацию двух кадров данных стандартов ZigBee и WirelessHART на канальном уровне модели OSI. Архитектура эмулятора включает три программных модуля (скрипта), написанных в среде Visual Code Studio на языке программирования Python.

**Ключевые слова.** БСС, интероперабельность, ZigBee, WirelessHART, программный эмулятор, унификация кадров данных.

**Введение**

Интеграция данных и совместимость стандартов беспроводной сенсорной сети (БСС) — одна из важнейших научно-исследовательских проектов в области индустрии 4.0 [2, с. 484]. До сих пор, не существует готовых и открытых стандартов, способных гарантировать и обеспечить совместимость и интероперабельность промышленных компонентов с разными протоколами. В качестве решения проблемы интероперабельности были предложены две методики унификации форматов кадров данных на канальном уровне модели OSI (универсальная и посредник) [2, с. 484]. В этой статье мы представляем программную реализацию предложенного нами решения вопроса интероперабельности стандартов беспроводных сенсорных сетей, где программный эмулятор для обеспечения интероперабельности стандартов БСС ZigBee и WirelessHART (с использованием методика «посредника») был разработан и реализован с использованием Python и visual code studio.

## Методы унификации кадров данных стандартов БСС

Для решения вопроса совместимости стандартов БСС мы проанализировали структуру фреймов наиболее популярных используемых стандартов беспроводных сенсорных сетей в промышленности и области индустрии 4.0 (ZigBee, Wi-Fi и WirelessHART). Форматы кадров стандартов (ZigBee, Wi-Fi и WirelessHART) на канальном уровне приведены в табл. 1. в [4, с. 40]. На основе анализа предложили 2 методики унификации форматов кадров данных (универсальная методика и посредник) на канальном уровне модели OSI. Предложенные методики оценены с точки зрения соотношения размера заголовков к общему размеру кадра и в результате оценки, оказалась, что методика «посредника» для пары протоколов ZigBee и WirelessHART более эффективнее универсальной методики [2, с. 485]. В таблице [1] представлен кадр данных, полученный на канальном уровне, применив посредника методики для пары ZigBee и WirelessHART. Итак, мы будем смоделировать работу этого общего фрейма данных для пары ZigBee и WirelessHART, полученного методикой «посредника».

Таблица 1

Общий фрейм данных для пары ZigBee и WirelessHART  
(методика посредника) [1, с. 88].

Управление кадром	Порядковый номер	Поле адреса	Идентификатор сети	Спецификатор адреса
2 байт	1 байт	до 20 байт	2 байт	1 байт
Тип DLPDU	Код целостности сообщения (MIC)	Полезная нагрузка	Контрольная сумма	
1 байт	4 байт	до 127 байт	2 байт	

### Структура и Архитектура программного эмулятора

Чтобы построить программный эмулятор, необходимо понять процедуру унификации, которая происходит следующим образом: беспроводные узлы отправляют свои собственные кадры; кадры данных поступают в устройство унификации. В устройстве унификации заголовки кадров обоих стандартов декапсулируются в поля; после прохождения фазы унификации инкапсулируются унифицированные заголовки и создается новый общий унифицированный фрейм данных. Новый общий фрейм данных состоит из следующих полей:

1. Общий заголовок, содержащий общие и уникальные заголовки обоих стандартов, такие как управление кадром, порядковый номер, поле адреса, идентификатор сети и т. д.
2. Собственная сохраненная полезная нагрузка стандарта.
3. Новая рассчитанная контрольная сумма.

После получения общего унифицированного кадра на этапе инкапсуляции, при необходимости, мы можем декапсулировать полученный кадр обратно, для получения исходного кадра стандарта [2, с. 485].

Архитектура эмулятора включает в себя три программных модуля (скрипта). Первый сценарий эмулирует устройство WirelessHART (узел WirelessHART), второй эмулирует устройство ZigBee (узел ZigBee), а третий сценарий эмулирует процесс унификации фреймов обоих стандартов [1, с. 89]. Структуру первого и второго скриптов можно обобщить в виде следующей последовательности: сначала описание заголовков, затем генерация собственной полезной нагрузки каждого стандарта,

вычисление контрольной суммы, инкапсуляция всех полей и, в конце, отправка фрейма данных на приемное устройство (скрипт унификации). Скрипт унификации фреймов, в свою очередь, состоит из подпрограмм (функций и процедур), выполняющих различные процессы, такие как: проверка значения контрольной суммы, инкапсуляция и декапсуляция полей данных, создание нового фрейма и т.д. На рис.2. [1, с. 90] и рис.3. [1, с. 91] представлены алгоритмы работы программы узлов и программы унификации.

### Результаты исполнения

Для реализации описанной выше архитектуры мы использовали язык программирования Python и Visual Code Studio. Для тестирования работы эмулятора и проверка возможности обеспечения совместимости кадров данных были заданы следующие значения полезной нагрузки: 60 для кадра ZigBee и 50 для кадра WirelessHART в скриптах узлов. Результат работы разработанного эмулятора показан на рис.1. В терминале мы видим следующие параметры: сообщения заголовков ZigBee и WirelessHART, сгенерированная полезная нагрузка, контрольная сумма, кадры данных обоих стандартов, проверка значения контрольной суммы, унифицированные заголовки, унифицированные кадры данных, длина кадров и время исполнения в секундах.

```
PS C:\Users\farah> python .\WZ.py 50 60
Headers message of WirelessHart is b'\x01\x03\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18\x19\x1a\x1b\x1c\x1d\x1e\x1f\x20'
Random number of payload is 50
Payload of WirelessHart is b'\x00\x01\x02\x03\x04\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18\x19\x1a\x1b\x1c\x1d\x1e\x1f\x20\x21\x22\x23\x24\x25\x26\x27\x28\x29\x1a\x1b\x1c\x1d\x2e\x2f\x30\x31'
Message of WirelessHart is b'\x01\x03\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18\x19\x1a\x1b\x1c\x1d\x1e\x1f\x20\x21\x22\x23\x24\x25\x26\x27\x28\x29\x1a\x1b\x1c\x1d\x2e\x2f\x30\x31\x32\x33\x34\x35\x36\x37\x38\x39\x3a\x3b\x3c\x3d\x3e\x3f\x40'
Length of WirelessHart message in bytes is 78
Headers message of ZigBee is b'\x01\x02\x03\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18'
Random number of payload is 60
Payload of ZigBee is b'\x00\x01\x02\x03\x04\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18\x19\x1a\x1b\x1c\x1d\x1e\x1f\x20\x21\x22\x23\x24\x25\x26\x27\x28\x29\x1a\x1b\x1c\x1d\x2e\x2f\x30\x31\x32\x33\x34\x35\x36\x37\x38\x39\x3a\x3b\x3c\x3d\x3e\x3f\x40'
Message of ZigBee is b'\x01\x02\x03\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18\x19\x00\x01\x02\x03\x04\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18\x19\x1a\x1b\x1c\x1d\x1e\x1f\x20\x21\x22\x23\x24\x25\x26\x27\x28\x29\x1a\x1b\x1c\x1d\x2e\x2f\x30\x31\x32\x33\x34\x35\x36\x37\x38\x39\x3a\x3b\x3c\x3d\x3e\x3f\x40'
Length of ZigBee message in bytes is 85
-----
<Popen: returncode: 1 args: ['python', 'WZ024.py', '']>
-----
<Popen: returncode: 1 args: ['python', 'Z2024.py', '']>
Checksum of WirelessHart is correct
Checksum of ZigBee is correct
CRC of WirelessHart b'\x12\x00'
CRC of ZigBee b'\xf1\x00'
Unification headers is b'\x01\x02\x03\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18\x19\x1a\x1b\x1c\x1d\x1e\x1f\x20'
Length of the unified headers in bytes is 31
Unifed message of WirelessHart is b'\x01\x02\x03\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18\x19\x1a\x1b\x1c\x1d\x1e\x1f\x20\x21\x22\x23\x24\x25\x26\x27\x28\x29\x1a\x1b\x1c\x1d\x2e\x2f\x30\x31\x32\x33\x34\x35\x36\x37\x38\x39\x3a\x3b\x3c\x3d\x3e\x3f\x40'
Length of the unified message of WirelessHart in bytes is 83
Unifed message of ZigBee is b'\x01\x02\x03\x05\x06\x07\x08\x09\x0a\x0b\x0c\x0d\x0e\x0f\x10\x11\x12\x13\x14\x15\x16\x17\x18\x19\x1a\x1b\x1c\x1d\x1e\x1f\x20\x21\x22\x23\x24\x25\x26\x27\x28\x29\x1a\x1b\x1c\x1d\x2e\x2f\x30\x31\x32\x33\x34\x35\x36\x37\x38\x39\x3a\x3b\x3c\x3d\x3e\x3f\x40'
Length of the unified ZigBee message in bytes is 93
End of unification program
Execution time in seconds 0.221109
```

Рис. 1. Результаты исполнения программного эмулятора унификации кадров.

Как видно из результата, унифицированный фрейм данных каждого узла (выраженный в Unified message of WirelessHART and ZigBee) содержит: унифицированные заголовки, полученные в процессе унификации (выраженные в Unification headers), собственную полезную нагрузку каждого стандарта (выраженная в Random number of payload) и новая рассчитанная контрольная сумма (выраженная в CRC of WirelessHART and ZigBee). Из полученных результатов за счет процесса унификации, показатели эффективности заключаются следующим:

1. Обеспечена совместимость кадров стандартов WirelessHART и ZigBee, (раньше кадры стандартов были несовместимы, а теперь совместимы, это считается качественным эффектом).

2. Снижена эффективность, за счет увеличения количество заголовков. Заметно из результатов исполнения эмулятора (рис.1), что длина кадров после унификации увеличилась.

3. Увеличено время обработки за счет процесса унификации (увеличение количество заголовков, приводит к увеличению времени обработки).

### **Заключение**

В данной статье мы представили эмуляцию процесса унификации двух кадров данных стандартов БСС (ZigBee и WirelessHART) по методике «посредника», которой мы предложили в ранних работах в качестве теоретического решения проблемы совместимости стандартов БСС. Скрипты эмулятора были написаны, используя язык программирования Python. Дальнейшая работа будет сосредоточена на развитие работы эмулятора и исследование его показателей эффективности.

### **Список литературы**

1. Сосенушкин С.Е., Юсеф Ф., Структура и алгоритм работы программного эмулятора унификации кадров данных узлов стандартов ZigBee и WirelessHART// Сборник статей IV межвузовской научно-практической онлайн-конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 86-92.
2. Сосенушкин С.Е., Юсеф Ф., Архитектура программной эмуляции интерфейса обеспечения интероперабельности протоколов беспроводных сенсорных сетей// Сборник докладов III всероссийской научно-практической конференции. Томск, 2023 г, С. 484-488.
3. Юсеф Ф., Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный эмулятор для обеспечения унификации двух кадров данных стандартов ZigBee и WirelessHART на канальном уровне» № 2023616765 от 03.04.2023г.
4. Сосенушкин С.Е., Юсеф Ф., Обеспечение интероперабельности стандартов ZigBee, Wi-Fi и WirelessHART на основе унификации форматов кадров// Вестник МГТУ СТАНКИН №2 (61), 2022.
5. Majid M., Habib S., Javed A., Rizwan M., Srivastava G., Gadekallu T. R. and Lin J. C-W, Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review// Sensors, 2022, 22(6), 2087.
6. Raza M., Aslam N., Le-Minh H., Hussain S., Cao Y. and Khan N.M., A Critical Analysis of Research Potential, Challenges and Future Directives in Industrial Wireless Sensor Networks// IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(1), pp. 39–95.

7. Tayur V. M. and Suchithra R., Review of Interoperability approaches in Application Layer of Internet of Things// International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), 2017.
8. Wang Q., and Jiang J., Comparative Examination on Architecture and Protocol of Industrial Wireless Sensor Network Standards// IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3), pp. 2197–2219.
9. Ehrlich M., Wisniewski L. and Jasperneite J., State of the Art and Future Applications of Industrial Wireless Sensor Networks// Kommunikation Und Bildverarbeitung in Der Automation, 2017, pp. 28–39.
10. K V. and Sharma K., Wireless Sensor Network for Industry 4.0, International Journal of Innovative Research in Electrical// Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 2020, Vol. 8, Issue 1.
11. Dehkordi S. A., Farajzadeh K., Rezazadeh J., Farahbakhsh R., Sandrasegaran K. and Dehkordi M. A., A survey on data aggregation techniques in IoT sensor networks// Wireless Networks, 2019.
12. Oliveira L., Rodrigues J., Kozlov S., Rabêlo R., and de Albuquerque V., MAC Layer Protocols for Internet of Things: A Survey// Future Internet, 2019, 11(1), 16.
13. Han S., WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control, Available at // URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/c8f5/a41241a7a5df30cabd29ebaa4fb006761040.pdf>
14. Martin T., WirelessHART: An Overview. Available at // URL: [https://d2cpnw0u24fjm4.cloudfront.net/wp-content/uploads/WLPC\\_EU17-WirelessHART-TroyMartin.pdf](https://d2cpnw0u24fjm4.cloudfront.net/wp-content/uploads/WLPC_EU17-WirelessHART-TroyMartin.pdf) (accessed 30.10.2021).
15. Bayou L., Assessment and enforcement of wireless sensor network-based SCADA systems security, Available at: URL: // <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02057992/document> (accessed 25.09.2021).
16. Беспроводные локальные сети, Режим доступа: URL: // [https://bookasutr.ru/Chapter2\\_11\\_2.aspx#ZigBee](https://bookasutr.ru/Chapter2_11_2.aspx#ZigBee) (дата обращения 23.09.2021).
17. ZigBee specification, Available at: // URL: [https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2011/kjb79\\_ajm232/pmeter/ZigBee%20Specification.pdf](https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2011/kjb79_ajm232/pmeter/ZigBee%20Specification.pdf) (accessed 23.10.2021).
18. IEEE 802.11: Wireless Local Area Networks (WLANs), Available at: URL: // <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/047086804X.app6> (accessed 27.09.2021).
19. Calculate and verify checksums, Available at: // URL: [https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90002002/Tasks/t\\_calculate\\_checksum.htm?TocPath=API%20Operation%7C-API%20frame%20format%7C\\_\\_\\_\\_\\_1](https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90002002/Tasks/t_calculate_checksum.htm?TocPath=API%20Operation%7C-API%20frame%20format%7C_____1) (accessed 02.04.2022).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В ДНК ПРИ КОНЕЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

**Н.С. Фиалко, М.М. Ольшевец, В.Д. Лахно**

ИМПБ РАН – филиал ИПМ им.М.В.Келдыша РАН,  
Пушино, Московская область, Россия

142290, ул. проф. Виткевича д.1

Tel.: (+7 4967)318-529, e-mail: fialka@impb.ru

Математическое моделирование является одним из инструментов исследования процессов переноса заряда в биополимерах, таких как ДНК. Актуальность исследований переноса заряда в ДНК связана, в частности, с развитием нанобиоэлектроники, которая является потенциальной заменой современной микроэлектроники, основанной на полупроводниковых технологиях [1–3].

В рамках поляронных моделей описание переноса заряда в молекулярных цепочках сводится к следующему. Биополимер моделируется цепочкой сайтов (групп сильно связанных атомов), движение которых описывается классическими уравнениями движения. По цепочке распространяется квантовая частица (электрон или дырка), движение которой описывается уравнением Шредингера. Квантовая и классическая подсистемы связаны: смещения сайтов влияют на вероятности нахождения заряда, и наоборот.

Важным этапом при проведении вычислительного эксперимента является учет температуры окружающей среды. При моделировании можно применять различные способы задания температуры (под температурой понимают среднюю кинетическую энергию  $N$ -сайтовой цепочки): когда постоянна полная энергия  $E$  системы (микрoканонический ансамбль), и когда сохраняется температура  $T$  цепочки (канонический ансамбль).

Ранее было показано, что в модели Холстейна с термостатом Ланжевена (к классическим уравнениям системы добавляются члены с трением и случайная сила со специальным распределением, NT ансамбль) разрушение полярона зависит не от температуры  $T$ , а от тепловой энергии цепочки из  $N$  сайтов  $k_B T$  [4,5]. Эти результаты плохо согласуются с предположением, что разрушение полярона при относительно малой температуре связано с использованием источника белого шума, который иногда выбрасывает частицу из поляронной ямы даже при малой интенсивности шума.

При таких же параметрах модели мы провели расчеты динамики заряда для гамильтоновой системы, в которой температура имитируется только заданием начальных скоростей и смещений классических сайтов (NE ансамбль). Для заряда рассмотрены различные начальные состояния – полярон, возникновение заряда в начальный момент на одном сайте, равномерное распределение по всем сайтам. Получена сходная картина для области поляронных состояний: при некоторой малой начальной температуре в цепочке  $N$  сайтов полярон существует, а в цепочке  $2N$  сайтов при этой же температуре на больших временах заряд находится в делокализованном состоянии. Т.е. на разрушение полярона влияет не случайное воздействие белого шума с (возможно) редкими, но большими по амплитуде выбросами; область существования полярона определяется полной энергией системы.



Проведено сравнение результатов, полученных в модели с термостатом Ланжевена (усреднение по реализациям), с результатами расчетов динамики в гамильтоновой системе (усреднение по времени). Показано, что переход от полярного режима к делокализованному состоянию происходит в одинаковом диапазоне тепловой энергии для обоих вариантов термостата, однако здесь для гамильтоновой системы температура – не заданная начальными данными, а определенная после расчета из средней кинетической энергии.

Для больших температур результаты, усредненные по набору траекторий, в системе со случайной силой и результаты, усредненные по времени, для гамильтоновой системы близки, что не противоречит гипотезе эргодичности. При моделировании мы использовали параметры, соответствующие однородным синтетическим ДНК polyA, polyG и polyT [6,7]. Результаты расчетов показывают, что начальное полярное состояние приводит к охлаждению цепочки, а появление заряда на одном сайте в начальный момент – к незначительному нагреву. Например, для polyA фрагментов длиной  $N$  нуклеотидных пар внесение полярона приводит к охлаждению на  $\Delta T \approx 1400/N$  [K], а появление заряда в начальный момент на одном сайте – к нагреву на  $\Delta T \approx 150/N$  [K], т.е. для цепочки  $N = 40$  сайтов получаем  $\Delta T \approx 4 \text{ K} \ll T$  при температурах  $T \approx 300 \text{ K}$ . По результатам моделирования, при биологически значимых температурах можно использовать любой вариант задания термостата.

Мы благодарны сотрудникам ЦКП ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (<http://ckp.kiam.ru>) за предоставленные вычислительные мощности k-100 и k-60

#### Список литературы

1. Chakraborty T. (Ed.) Charge Migration in DNA. Perspectives from Physics, Chemistry, and Biology. Berlin: Springer, 2007.
2. Offenhäusser A., Rinaldi R. (Eds.) Nanobioelectronics – for Electronics, Biology, and Medicine. New York: Springer, 2009.
3. В.Д.Лахно, А.В.Винников // *Мат. биол. биоинф.*, т. 16, no 1, 2021, с. 115–135.
4. Лахно В.Д., Фиалко Н.С. // *ЖЭТФ*, т.147, 2015, с.142–148
5. Фиалко Н.С., Соболев Е.В., Лахно В.Д. // *ЖЭТФ*, т.151, №4, 2017, с.744
6. Voityuk A.A., Rosch N., Bixon M., Jortner J. // *J. Phys. Chem. B*, V.104. № 41, 2000, P.9740–9745.
7. Jortner J., Bixon M., Voityuk A.A., Roesh N. // *J. Phys. Chem. A*, V. 106, № 33, 2002, P.7599–7606.

# ПРИМЕНЕНИЕ CUDA В ДИЗАЙНЕ ПРАЙМЕРОВ ДЛЯ ПЕТЛЕВОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АМПЛИФИКАЦИИ

В. Д. Хайритдинов<sup>1</sup>, Л.У. Ахметзянова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет

**Аннотация.** Цель статьи заключается в рассмотрении применения программно-аппаратной технологии параллельных вычислений CUDA в дизайне праймеров для петлевой изотермической амплификации. Для решения проблемы ограничений скорости и памяти при сортировке наборов праймеров для LAMP был разработан программный комплекс, позволяющий осуществлять удалённый дизайн праймеров для LAMP на выделенном сервере с применением технологии параллельных вычислений CUDA. Проведено тестирование, наблюдение и анализ производительности.

**Ключевые слова.** Амплификация, параллельные вычисления, облачные вычисления, LAMP, праймеры, CUDA.

Как показывают события последних лет, в настоящее время остро стоит вопрос быстрого и точного диагностирования различных вирусных и бактериальных патогенов. Вирусы могут очень быстро мутировать и развиваться, выводя новые штаммы, и для новых штаммов необходимы свои средства для диагностики. Для этого необходима работа с ДНК или РНК вирусов, которые состоят из двух последовательностей нуклеотидов – особых кислот, которые образуют базовую и комплементарную цепь, скрученную друг с другом и содержащую в себе генетический материал организма. Нуклеотиды, как правило, обозначают буквами А, G, С, Т – аденин, гуанин, цитозин и тимин соответственно.

Для диагностирования вирусов используется метод амплификации, который состоит в синтезировании определённой нуклеотидной последовательности, если она присутствует в ДНК организма, то процесс амплификации приводит к накоплению множества копий, по наличию которых можно определить, заражён ли пациент вирусом или нет. Помимо молекулярной диагностики, амплификация также используется в установлении генетического родства, а также криминалистике.

Для проведения реакции амплификации требуются наборы праймеров, расположенные последовательно. Праймеры – нуклеотидные последовательности длиной 20-25 нуклеотидов, разделяющиеся на базовые и комплементарные. Каждый праймер имеет собственную температуру отжига, свой состав гуанина и цитозина (GC-состав) и длину. Количество праймеров, а также другие параметры зависят от метода и специфики амплификации.

Существуют различные методы амплификации. Самой популярной на данный момент является ПЦР (полимеразная цепная реакция), которая была изобретена в 1983 году и по сей день широко используется в диагностике и имеет множество имплементаций и научной базы [1]. Также существует метод LAMP (Петлевая изотермическая амплификация), изобретённая в 2000 году [2]. Этот метод не так широко распространён, как ПЦР, но имеет ряд преимуществ:

- Высокая скорость амплификации (первые результаты можно увидеть через 15 минут).
- Изотермальность – вся реакция проходит при одной температуре (60°-65°), в отличие от ПЦР.

- Не требует лабораторных условий (достаточно паровой бани или термостата для поддержания температуры).
- Возможен анализ результатов невооружённым глазом.

Помимо преимуществ, метод LAMP имеет также недостаток, заключающийся в том, что он достаточно новый и относительно мало изучен, а также для проведения LAMP требуются наборы от 4 праймеров по сравнению с двумя праймерами для ПЦР. Это усложняет процесс подбора (дизайна) праймеров, и решение этой проблемы является актуальной задачей.

Поэтому целью работы является разработка быстродействующего программного обеспечения дизайна праймеров для LAMP с жёсткими условиями подбора и с использованием технологии CUDA.

Для уменьшения временных затрат дизайна праймеров будут использоваться параллельные вычисления, реализованные при помощи технологии CUDA - программно-аппаратной архитектуре параллельных вычислений, которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность благодаря использованию видеокарт фирмы Nvidia.

Модуль вычислений реализован на языке программирования C++ с компиляцией при поддержке средств CUDA. Взаимодействие с вычислительным модулем будет производиться при помощи строк формата JSON (JavaScript Object Notation). Поскольку C++ не имеет встроенных средств, для работы с этим форматом, то используется собственная библиотека. Сайт и интерфейс реализованы при помощи использования языка JavaScript. Роль базы данных исполняет Firebase Realtime Database, организованная по следующей схеме (рисунок 1):

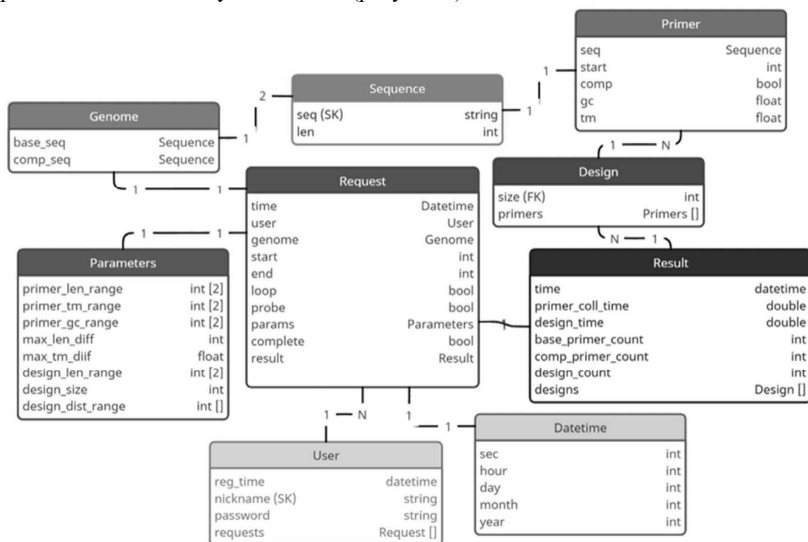


Рисунок 1 – Схема базы данных

По сравнению с представленными на рынке альтернативами, данный программный продукт имеет несколько преимуществ:

- Высокая скорость дизайна праймеров.
- Работа с длинными нуклеотидными последовательностями.
- Вычисления осуществляются на сервере.
- Наличие интерфейса с поддержкой нескольких языков.

Разработанный программный комплекс может быть использован для исследования и анализа в молекулярной биологии и генетике, для создания диагностических тест-систем, обеспечивающих высокую чувствительность и достоверность обнаружения специфических ДНК и РНК. Программный комплекс может применяться в научно-исследовательских институтах и лабораториях, занимающихся амплификацией нуклеиновых кислот.

### Список литературы

1. Garibyan L, Avashia N. Polymerase chain reaction. *J Invest Dermatol.* 2013 Mar;133(3):1-4.
2. Notomi T, Okayama H, Masubuchi H, Yonekawa T, Watanabe K, Amino N, Hase T (2000). "Loop-mediated isothermal amplification of DNA". *Nucleic Acids Res.* 28 (12): 63e-63.
3. Ахметзянова Л.У., Давлеткулов Т.М., Гарафутдинов Р.Р., Губайдуллин И.М. Применение алгоритма Ахо-Корасик для подбора праймеров для петлевой изотермической амплификации. *Математическая биология и биоинформатика.* 2022. Т. 17. № 2. С.250-265 doi: 10.17537/2022.17

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ И БАРОСТАТИРОВАНИЯ НА РЕЛАКСАЦИЮ СИСТЕМЫ ПРИ МОЛЕКУЛЯРНО- ДИНАМИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

А. И. Черняков<sup>1</sup>, В. О. Подрыга<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МАДИ, г. Москва, Россия

125319, Ленинградский проспект, д. 64,

<sup>2</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

125047, Миусская пл., д. 4,

E-mail: chernjakov2@gmail.com

В последние годы очень широко ведутся исследования в сфере нанотехнологий. Одной из важнейших задач является разработка и исследование наноматериалов, которые могут обладать уникальными физическими и функциональными свойствами, могут применяться в строительстве, промышленности, медицине и других сферах. Для их изучения используются различные методы, в частности метод молекулярной динамики [1, 2]. Он позволяет изучать свойства материала, моделируя поведение отдельных частиц через интегрирование их уравнений движения. Каждая частица перемещается согласно законам Ньютона, которые можно описать дифференциальным уравнением:

$$\ddot{\vec{r}} = \vec{F} / m,$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор частицы,  $\vec{F}$  – сила, которая действует на частицу,  $m$  – масса частицы. Сила, действующая на частицу  $i$ , включает действие на частицу со стороны остальных частиц и внешние воздействия  $\vec{F}^{ext}$ :

$$\vec{F}_i = \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij} + \vec{F}^{ext}, \quad i, j = 1..N.$$

Здесь  $N$  – число частиц системы.

Значение силы, действующей на частицу со стороны другой частицы, выражается через градиент потенциала межчастичного взаимодействия:

$$\vec{F}_{ij} = -\nabla U\left(\left|\vec{r}_{ij}\right|\right),$$

$$\text{где } \vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j.$$

В этой работе используется потенциал Леннарда-Джонса [3]:

$$U\left(\left|\vec{r}_{ij}\right|\right) = 4\varepsilon \left( \left( \frac{\sigma}{\left|\vec{r}_{ij}\right|} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{\left|\vec{r}_{ij}\right|} \right)^6 \right).$$

Для аргона  $\varepsilon = 1.712 \cdot 10^{-21}$  Дж,  $\sigma = 0.3418$  нм.

С учетом радиуса обрезания данный потенциал принимает следующий вид:

$$U_{ij} = \begin{cases} U(|\vec{r}_{ij}|) - U(r_{cut}), & |\vec{r}_{ij}| \leq r_{cut}, \\ 0, & |\vec{r}_{ij}| > r_{cut}, \end{cases}$$

где  $r_{cut} = 2.5\sigma$  – радиус обрезания потенциала.

Начальные условия и граничные условия зависят от условий задачи. В данной работе рассматривается система частиц аргона, на границах установлены периодические граничные условия. Координаты частиц в начальный момент времени распределены равномерно по исследуемому объему в узлах сетки с ребром 3.338339 нм, что соответствует температуре 273.15 К и давлению 1 атм [4]. Начальные скорости инициализируются согласно распределению Максвелла в соответствии с заданной температурой.

Для численного решения поставленной задачи используется разностная схема Верле [5]. В этой работе реализована схема Верле в скоростной форме:

$$\begin{aligned} \vec{r}(t + \Delta t) &= \vec{r}(t) + \vec{v}(t)\Delta t + \frac{1}{2}\vec{a}(t)\Delta t^2, \\ \vec{v}(t + \frac{\Delta t}{2}) &= \vec{v}(t) + \frac{1}{2}\vec{a}(t)\Delta t, \\ \vec{a}(t + \Delta t) &= \frac{\vec{F}(t + \Delta t)}{m}, \\ \vec{v}(t + \Delta t) &= \vec{v}(t + \frac{\Delta t}{2}) + \frac{1}{2}\vec{a}(t + \Delta t)\Delta t, \end{aligned}$$

где  $\vec{v}$  – скорость частицы,  $\vec{a}$  – ускорение частицы,  $t$  – время предыдущего шага,  $\Delta t$  – шаг интегрирования.

Для управления такими параметрами системы как температура и давление в молекулярной динамике используются специальные алгоритмы – термостат и баростат. В данной работе для термостатирования и баростатирования системы частиц рассматриваются термостат и баростат Берендсена [6, 7]. В алгоритмах используются эмпирические коэффициенты, которые подбираются в зависимости от задачи. В работе проведено исследование поведения системы частиц в зависимости от этих параметров.

Термостат Берендсена опирается на метод масштабирования скоростей, но при этом добавляет параметр  $\tau_t$ , от которого зависит, насколько скоро система придет к целевой температуре. Его применение позволяет быстро достичь целевой температуры, привести систему в термодинамическое равновесие. Баростат Берендсена по свойствам похож на термостат Берендсена и тоже имеет коэффициент  $\tau_b$ , который отвечает за скорость релаксации системы.

В ходе исследования была реализована программа на языке программирования Rust [8] для моделирования молекулярно-динамической системы с использованием алгоритма Верле в скоростной форме, были реализованы инициализация скоростей в соответствии с распределением Максвелла, инициализация координат в соответствии с примитивной кристаллической решеткой, периодические граничные условия, расчет макропараметров системы, генерация данных для построения гистограмм скоростей частиц на выбранном шаге, алгоритмы термостатирования и баростатирования Берендсена. Для ускорения вычислений использовалась библиотека Rayon [9]. Эта

библиотека реализует параллелизм данных, она создает пул потоков, между которыми равномерно разделяются задачи, каждая из которых выполняет работу над одним из элементов массива частиц. Код разработанной программы можно найти в репозитории [10].

Были проведены вычисления с использованием рассмотренных термостатов/баростатов на простейшей системе частиц с целью выявления закономерностей. Для расчетов использовалась система из 1000 частиц аргона с начальной температурой 273.15 К и при атмосферном давлении. Во всех расчетах для термостата стояла целевая температура 500 К, а для баростата целевое давление – 10 атм. Первая серия вычислений была проведена с включенным термостатом Берендсена с различными параметрами  $\tau_t$ . После этого параметр  $\tau_t$  термостата был зафиксирован на значении 10, и была проведена серия вычислений с изменением параметра  $\tau_b$  баростата. Результаты расчетов представлены на Рис. 1. Была выявлена закономерность для отношения параметров термостата и баростата, согласно которой, если  $\tau_b < \tau_t$ , возникает эффект «перескока» на графике давления. Далее для подтверждения гипотезы была проведена еще одна серия вычислений с другим фиксированным параметром термостата  $\tau_t = 1$  (см. Рис. 2).

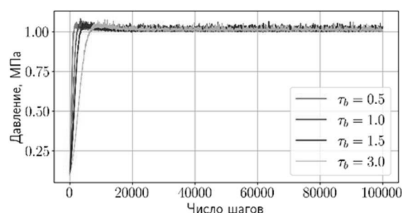


Рис. 1. Полученные значения давления при фиксированном  $\tau_t = 10$ .

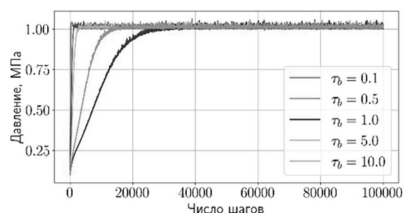


Рис. 2. Полученные значения давления при фиксированном  $\tau_t = 1$ .

### Список литературы

1. Frenkel D., Smit B. Understanding molecular simulation from algorithm to applications. – New-York: Academic Press, 2002.
2. Rapaport D.C. The Art of molecular dynamics simulation. 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
3. Lennard-Jones J.E. Cohesion // Proceedings of the Physical Society, v.43, №5. 1931, P. 461–482.
4. Подрыга В.О., Вихров Е.В., Поляков С.В. Молекулярно-динамический расчет коэффициента диффузии газов на примере аргона, азота, водорода, кислорода, метана и углекислого газа // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, №96. 2019, 24 с.
5. Verlet L. Computer experiments on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules // Physical Review, v.159. 1967, P. 98–103.
6. Berendsen H.J.C., Postma J.P.M., van Gunsteren W.F., DiNola A., Haak J.R. Molecular dynamics with coupling to an external bath // The Journal of Chemical Physics, v.81. 1984, P. 3684–3690.

7. Rühle V. Berendsen and Nose-Hoover thermostats. 2007. [Электронный ресурс] URL: [https://www2.mpip-mainz.mpg.de/~andrienk/journal\\_club/thermostats.pdf](https://www2.mpip-mainz.mpg.de/~andrienk/journal_club/thermostats.pdf) (дата обращения: 08.12.2023).
8. Официальный сайт языка программирования Rust. [Электронный ресурс] URL: <https://www.rust-lang.org/> (дата обращения: 08.12.2023).
9. Документация библиотеки Rayon. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.rs/rayon/latest/rayon/> (дата обращения: 08.12.2023).
10. Черняков А.И. Репозиторий с исходным кодом программы [Электронный ресурс] URL: <https://github.com/AndrewChe7/moldyn> (дата обращения: 08.12.2023).



## СТОЯЧАЯ ВОЛНА ВОЗМУЩЕНИЯ ЛИНИИ РОСТА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ

О. Н. Шабловский, И. А. Концевой

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,

Республика Беларусь, 246746, г. Гомель, проспект Октября, 48

E-mail: [shablovsky-on@yandex.by](mailto:shablovsky-on@yandex.by)

Изучено воздействие стоячей волны на фазовую границу высокоскоростной кристаллизации переохлажденного расплава чистого металла. Расчеты выполнены для никеля и меди.

**Ключевые слова:** высокоскоростная кристаллизация, неустойчивость линии роста, кривизна фазовой границы, дендритный рост.

**Введение.** Рассмотрим высокоскоростной дендритный рост кристалла из глубоко переохлажденного расплава чистого вещества. В настоящее время экспериментально достигнуты скорости роста 20–70 м/с в расплавах, переохлажденных до 300 К, [1]. Прикладное значение этих исследований связано с технологиями получения материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами.

**Цель данной работы:** определить условия существования стоячей волны возмущения и проанализировать кинетические параметры линии роста одиночного дендрита в чистых расплавах никеля (переохлаждение  $\Delta T \geq 166$  К) и меди ( $\Delta T \geq 180$  К).

**Линия роста дендрита.** Уравнение роста дендрита при глубоких переохлаждениях расплава чистого вещества получено в [2, 3] с учетом локально-неравновесных свойств теплопереноса. Запишем это уравнение в следующем виде:

$$\begin{aligned} (L + L_* + U_2 K) \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{N}{\gamma} (L_* + U_2 K) - \frac{cN^2}{\gamma\mu} - \frac{3c}{\mu} N \frac{\partial N}{\partial t} + \\ + L\gamma \frac{\partial^2 N}{\partial t^2} + 2U_2 N \frac{\partial K}{\partial t} + N(q_v + q_{nj} K) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{\partial^2 N}{\partial y^2}. \quad (2)$$

Здесь  $x = F(y, t)$  – двумерная плоская линия роста кристалла;  $x, y$  – прямоугольные декартовы координаты; ось  $x$  направлена вдоль оси симметрии дендрита в сторону твердой фазы;  $y$  – поперечная координата;  $t$  – время; считаем, что фазовая граница движется справа налево, в сторону отрицательных значений  $x$ ;  $N = \partial F / \partial t$ ;  $K = \partial^2 F / \partial y^2$ ;  $U_2 = cT_c U_1$ ;  $U_1 = U/L$ ;  $L_* = L - c_* \Delta T$ ;  $q_{nj} = N[(cN/\mu) - U_2 K - L_*] - L\gamma(\partial N / \partial t)$ ;  $c$  – объемная теплоемкость кристалла;  $c_*$  – объемная теплоемкость расплава;  $\mu$  – кинетический коэффициент;  $\gamma$  – время релаксации теплового потока;  $q_v < 0$  – объемный сток энергии, который моделирует отвод тепла от твердой фазы;  $L$  – теплота фазового перехода единицы объема

вещества;  $U$  – поверхностная энергия границы раздела фаз;  $T_c$  – равновесная температура кристаллизации;  $N < 0$  – скорость перемещения линии роста;  $K > 0$  – кривизна фазовой границы. Уравнения (1), (2) справедливы в малой окрестности вершины дендрита – вблизи  $y = 0$ .

Уравнение (1) имеет точное решение:

$$F_0(y, t) = N_0 t + (K_0 y^2 / 2), \quad (3)$$

$$N_0 < 0, K_0 > 0; N_0, K_0 - \text{const},$$

которое определяет стационарный параболический профиль, перемещающийся с постоянной скоростью (подробности изложены в [2]).

Линеаризация уравнения (1) на точном решении (3) выполняется в следующей форме:

$$F(y, t) = F_0(y, t) + f(y, t), \quad t \geq 0 \quad (4)$$

и имеет своим результатом уравнение, определяющее малое возмущение  $f(y, t)$ , [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - \alpha_0 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) + \alpha_1 \frac{\partial f}{\partial t} + \alpha_2 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - \alpha_3 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 0, \quad (5)$$

$$\alpha_i = s_i / (L\gamma), \quad i = 0, 1, 2, 3;$$

$$s_0 = -2N_0 U_2, \quad s_1 = (2K_0 N_0^2 c / \mu) - (cN_0 / \gamma \mu) - K_0 N_0 L_* - K_0^2 N_0 U_2,$$

$$s_2 = L + L_* + K_0 U_2 - (3cN_0 / \mu) - K_0 N_0 L\gamma,$$

$$s_3 = 2K_0 N_0^2 U_2 + N_0^2 L_* - (N_0 U_2 / \gamma) - (cN_0^3 / \mu).$$

Коэффициенты  $\alpha_i = \alpha_i(\Delta T)$  зависят от переохлаждения расплава посредством функций  $N_0 = N_0(\Delta T)$ ,  $\mu = \mu(\Delta T)$ . В работе [4] получены полуэмпирические зависимости  $N_0(\Delta T)$ ,  $\mu(\Delta T)$  для чистых расплавов никеля и меди. Кривизна  $K_0$  входит в (5) как свободный параметр: его числовое значение мы задаем, применяя известные в литературе [5] результаты экспериментальных измерений. Уравнение (5) формально содержит две «скорости звука»  $w_1^2 = \alpha_0$ ,  $w_2^2 = \alpha_3 / \alpha_2$ , существенно зависящие от  $\Delta T$ . В статье [6] рассмотрены дозвуковые, звуковые и сверхзвуковые режимы распространения бегущих волн вида  $f = f(y - bt)$ ,  $b \equiv \text{const} > 0$ . Были установлены следующие качественные свойства поведения линии роста. Режим «дозвуковой-1», для которого  $b^2 < w_1^2$ , допускает неустойчивость по типу «седло» либо ситуацию вида «устойчивый узел». Для случая «звук-1»,  $b^2 = w_1^2$ , характерен «неустойчивый узел». Промежуточный интервал скоростей  $0 < w_1^2 < b^2 < w_2^2$  дает «неустойчивый узел» либо «неустойчивый фокус». Для случая «звук-2», когда  $b^2 = w_2^2$ , имеем устойчивость типа «центр». Режим «сверхзвуковой-2»,  $0 < w_1^2 < w_2^2 < b^2$ , обладает состоянием «устойчивый узел» либо «устойчивый фокус». В данной работе рассматривается стоячая волна возмущения, скорость перемещения которой равна  $w_2$ .

В докладе представлены результаты расчетов в размерных и безразмерных величинах. При обезразмеривании применяем следующие масштабы времени и длины:  $t_b = 10^{-7}$  с,  $y_b = 10^{-6}$  м. Размерным коэффициентам  $\alpha_i$  соответствуют безразмерные  $\beta_i$ :

$$\beta_0 = \alpha_0 \frac{t_b^2}{y_b^2}, \quad \beta_1 = \alpha_1 t_b^2, \quad \beta_2 = \alpha_2 t_b, \quad \beta_3 = \alpha_3 \frac{t_b^3}{y_b^2}.$$

Переохлаждение расплава  $\Delta T$  всюду указано в градусах Кельвина. Числовые значения теплофизических параметров соответствуют известным в литературе справочным данным:

Никель, Ni:  $T_c = 1728\text{K}$ ,  $L = 2,14 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>,  $U = 0,38$  Дж/м<sup>2</sup>,  $\gamma = 1,3804 \cdot 10^{-7}$  с,  $c = 5,62 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К),  $\lambda = 69$  Вт/(м·К),  $\mu = 9,53$  м/(К·с),  $T_* = 1562\text{K}$ ,  $N_b = 5,3$  м/с.

Медь, Cu:  $T_c = 1357\text{K}$ ,  $L = 1,77 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>,  $U = 0,26$  Дж/м<sup>2</sup>,  $\gamma = 4,755 \cdot 10^{-8}$  с,  $c = 4,17 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К),  $\lambda = 317$  Вт/(м·К),  $\mu = 10,06$  м/(К·с),  $T_* = 1177\text{K}$ ,  $N_b = 11$  м/с.

Для всех рассматриваемых здесь вариантов принимаем  $K_0 = 10^7$  м<sup>-1</sup>.

### Стоячая волна возмущения

Незатухающая стоячая волна возмущения имеет вид

$$f(y,t)/H = \cos ky \sin mt, \quad t \geq 0, \quad y \in [0, y_1], \quad (6)$$

$$k^2 = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad m^2 = \frac{\beta_1 \beta_3}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2},$$

$$w_2 = m/k = (\beta_3 / \beta_2)^{1/2}, \quad (7)$$

где  $m/k$  – скорость стоячей волны, перемещающейся со скоростью звука  $w_2$ . Результаты расчета (рис. 1) этого режима возмущения демонстрируют отчетливые различия между никелем и медью. Для меди имеем:

$$\frac{\partial(2\pi/m)}{\partial(\Delta T)} < 0, \quad \frac{\partial(m/k)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

Для никеля хорошо видна немонотонная, имеющая максимум зависимость скорости волны (7) от  $\Delta T$ , рис. 1 б.

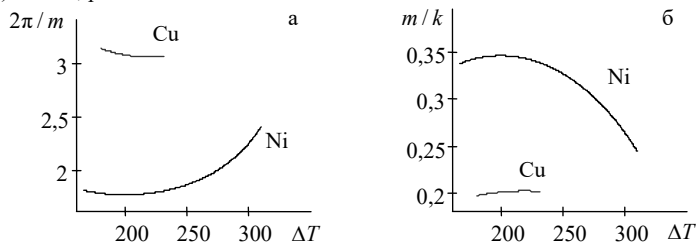


Рис. 1. Незатухающая стоячая волна возмущения: а – период колебаний во времени; б – скорость волны

Стоячая волна, затухающая с течением времени, определяется решением уравнений (4), (5):

$$f(y,t)/H = \exp(-rt)\cos ky \sin mt, \quad (8)$$

$$k^2 = H_1/H_0, \quad m^2 = H_2/H_0, \quad H_0 = \beta_3 - \beta_0\beta_2 + 2\beta_0r,$$

$$H_1 = 9\beta_2r^2 + \beta_1\beta_2 - r(3\beta_1 + 9r^2 + 2\beta_2^2),$$

$$H_2 = \beta_1\beta_3 + r[r(\beta_0\beta_2 + 3\beta_3) - 2\beta_0r^2 - 2\beta_2\beta_3].$$

При  $r = 0$  данное решение принимает вид (6).

Некоторые результаты расчетов даны на рис. 2. Отсюда следует, что параметр затухания оказывает значительное влияние на пространственно-временные свойства возмущенного состояния вершины дендрита.

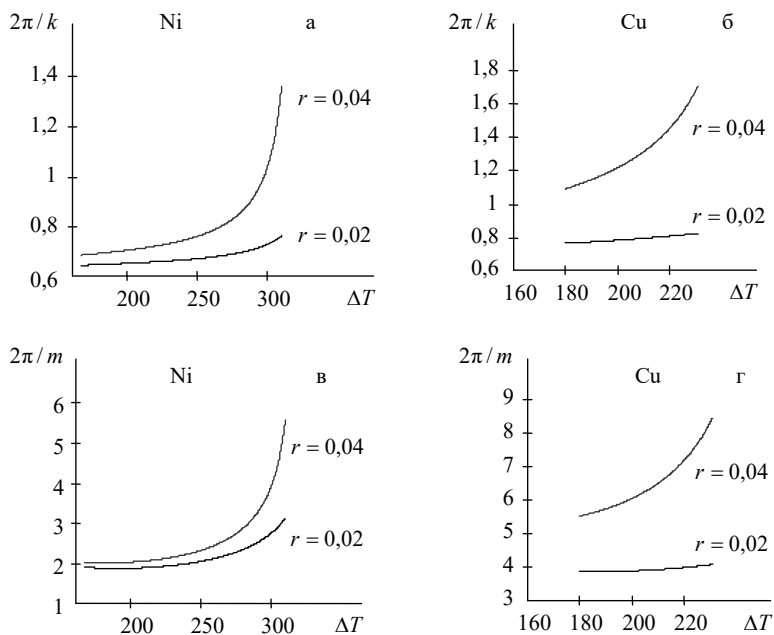


Рис. 2. Затухающая стоячая волна возмущения:  
а, б – период колебаний по координате  $y$ ;  
в, г – период колебаний во времени

**Заключение.** Кинетические свойства фазовой границы высокоскоростной кристаллизации чистых расплавов никеля и меди в значительной степени обусловлены локальной неравновесностью теплопереноса в твердой фазе. Определены условия существования стоячей волны возмущения вершины одиночного дендрита.

Представлены качественные и количественные закономерности поведения линии роста в широких интервалах переохлаждений расплавов никеля и меди.

### Список литературы

1. Herlach D. M., Galenko P., Holland-Moritz D. *Metastable Solids from Undercooled Melts*. Oxford: Pergamon, 2007.
2. Шабловский О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть 1. Уравнение фазовой границы кристаллизации // *Успехи прикладной физики*. – 2013. – Т. 1, № 6. – С. 680–685.
3. Шабловский О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть II. Аналитическая структура возмущений линии роста // *Успехи прикладной физики*. – 2014. – Т. 2, № 1. – С. 12–17.
4. Шабловский О. Н., Кроль Д. Г. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве // *Успехи прикладной физики*. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 189–202.
5. Mullis, A. M. Deterministic side-branching during thermal dendritic growth / A. M. Mullis // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 84. – 012071. – P. 1–9.
6. Шабловский, О. Н. Область устойчивости возмущенного состояния линии роста дендрита в глубоко переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого*. – 2023. – №1. – С. 5–12.

# УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УГЛОВЫХ ФРЕЗЕРНЫХ ГОЛОВОК

К.И. Шлаев, Ф.С. Сабиров

ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", Москва, Российская Федерация,  
127055, Москва, Вадковский пер., д.3а,  
e-mail: kir.shl@ya.ru, fanira5057@yandex.ru

Для расширения технологических возможностей станков в производственных процессах применяются угловые фрезерные головки. Их установка оказывает влияние на динамические характеристики станка, т.к. в конструкцию добавляется еще один узел, обладающей массой, податливостью и содержащий стыки между деталями. Для оценки влияния угловых головок на динамическое качество станка актуальным является разработка моделей угловых головок.

Анализ работ показал, что существующие модели не подходят для моделирования угловых головок. Причиной является их оригинальная конструкция - расположение валов под углом друг к другу (рис. 1). В большинстве проанализированных работ приведены модели для осесимметричных конструкций [1, 2], либо валы угловой головки моделируются независимо друг от друга [3, 4].

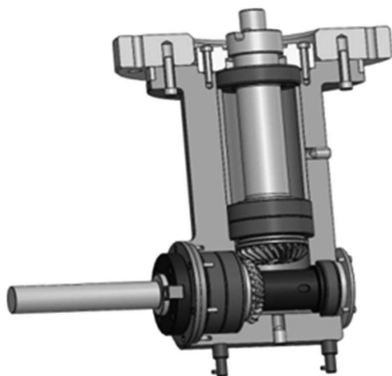


Рисунок 1. Конструкция угловой головки

В настоящей работе рассмотрено применение метода конечных элементов для моделирования угловых фрезерных головок с фиксированным углом поворота. Угловая головка моделируется матричным уравнением

$$[A]\{q'\} + [B]\{q'\} + [C]\{q\} = \{D\} \quad (1)$$

где  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$  - соответствующие матрицы инерции, демпфирования и жесткости системы угловой головки,  $\{q\}$ ,  $\{D\}$  - соответственно векторы обобщенных координат системы и действующих на нее сил. Решением уравнения являются смещения системы под действием на нее возмущающих сил [5].

Расчетная схема угловой головки состоит из 7 массивов (точки I, II, III, IV, V, VI, VII), 3 стержня (точки 5-6, 14-15, 17-18), 11 упруго-вязких стыков (точки 1-2, 3-4, 5-19, 6-20, 7-8, 9-10, 11-12, 12-22, 13-14, 16-17, 18-21) (рис. 2).

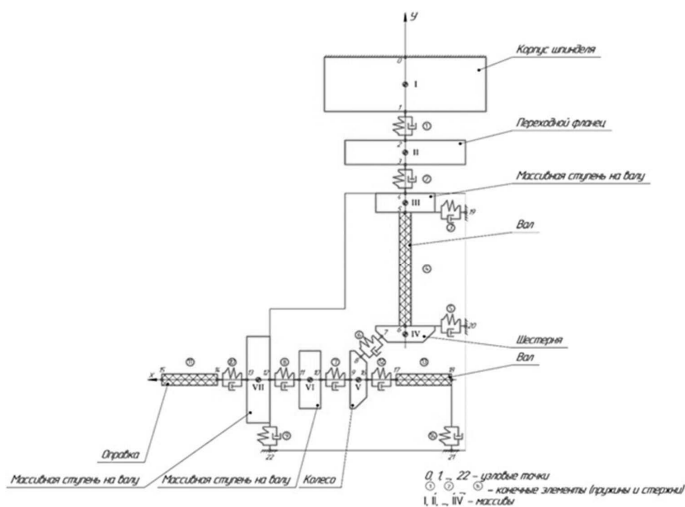


Рисунок 2. Расчетная схема угловой головки

Моделирование решения задачи начинается с построения несвязной матрицы жесткости системы СС для 14 конечных элементов [6].

$$[CC] = \begin{pmatrix} c^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c^4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c^8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c^9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c^{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c^{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c^{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c^{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c^{14} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Чтобы получить матрицу жесткости [С], необходимо соединить элементы. Для этого составляется матрица соединений.

При формировании инерционной матрицы [А] динамической системы также приходится учитывать наличие в расчетной схеме одновременно упругих конечных элементов с распределенной массой («стержней») (КЭ 4, 11, 13) и «массивов», инерционные характеристики которых сосредоточены в точках I-IV.

Инерционная матрица [A] системы представляется в виде суммы:

$$[A] = [A_p] + [A_c] \quad (3)$$

где

$$[A_p] = [G1]T[AA][G1] \quad (4)$$

формируется подобно [C] из несвязанной инерционной матрицы [AA] с помощью матрицы соединений. Матрица [Ac] формируется как блочно – диагональная с размещением матриц [Ai], определяемых:

$$[A_i] = \begin{pmatrix} \mu & 0 & 0 & 0 & S_x & -S_y \\ 0 & \mu & 0 & -S_x & 0 & S_z \\ 0 & 0 & \mu & S_y & -S_x & 0 \\ 0 & -S_x & S_y & \theta_{xx} & 0 & 0 \\ S_z & 0 & -S_x & -\theta_{xy} & \theta_{yy} & 0 \\ -S_y & S_x & 0 & -\theta_{xz} & -\theta_{yz} & \theta_{zz} \end{pmatrix} \quad (5)$$

в местах, соответствующих «массивам» расчетной схемы.

Матрица демпфирования элемента [B] по своей структуре аналогична соответствующей матрице жесткости [C].

Контакт между шестерней вертикального вала и колесом горизонтального вала угловой головки моделируется упруго-вязкой невесомой пружинкой, имитирующей упругие и диссипативные свойства соединения. Матрица жесткости и демпфирования данных пружин рассчитываются в локальной системе координат, а затем подвергается конгруэнтному преобразованию с помощью матрицы направляющих косинусов и таким образом приводятся к глобальной системе координат. Для учета вибраций и ударов, возникающих при работе зубчатого зацепления, в матрицу демпфирования была введена нелинейная составляющая:

$$[B] = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & b_7 + k(\dot{q}_7 - \dot{q}_8)^2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_8 + k(\dot{q}_7 - \dot{q}_8)^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & b_{11} \end{pmatrix} \quad (6)$$

где  $b_1, \dots, b_{11}$  – линейные коэффициенты демпфирования для узлов,

$k$  – параметр, отвечающий за нелинейность,

$\dot{q}_7, \dot{q}_8$  – скорости движения зубчатых колес

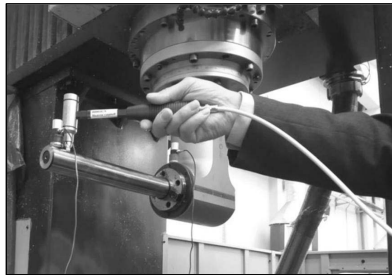


Рисунок 3. Импульсное возбуждение угловой фрезерной головки Alberti T90-8.



Для оценки результатов, полученных в ходе моделирования, была проведена серия экспериментальных исследований. Объектом исследования была угловая фрезерная головка Alberti T90-8 [7]. Экспериментальное исследование проводилось следующим образом: при неработающем станке динамометрическим молотком наносится удар по оправке (рис. 3), которая закреплена вместо инструмента на угловой головке [8].

К корпусу головки прикреплены два акселерометра (датчики вибрации) (рис. 4). Удар молотка вызывает возбуждение в несущей системе станка. Датчики регистрируют момент удара, и сигнал с них передается на аналого-цифровой преобразователь. Затем оцифрованный сигнал передается на компьютер для анализа [8].

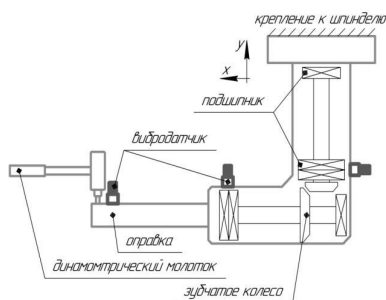


Рисунок 4. Схема расположения датчиков вибрации

В результате эксперимента была получена амплитудно-частотная характеристика угловой головки. Проведено сравнение с частотной характеристикой, полученной в результате моделирования (рис. 5).

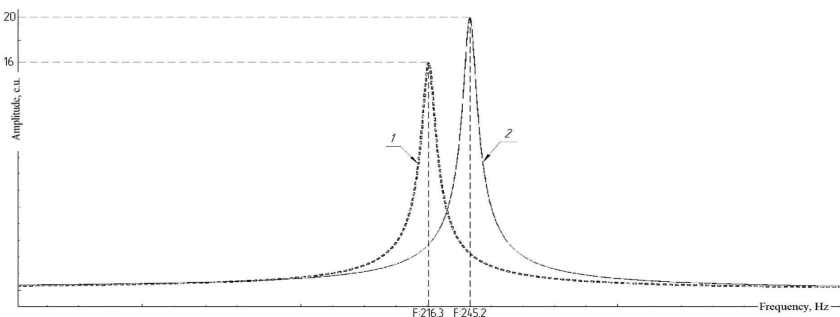


Рисунок 5. Частотная характеристика 1) получена экспериментально; 2) получена путем моделирования

Разница в собственной частоте, полученной из модели и экспериментально измеренной головкой, составляет 12%, что говорит об адекватности разработанной модели.

### Список литературы

1. Шереметьев К.В. Влияние ускорительной головки планетарного типа на качество обрабатываемой поверхности при фрезеровании концевыми фрезами. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - М., 2008. - 250 с.
2. Парфенов И.В. Улучшение динамических характеристик внутришлифовальных головок для обработки глубоких отверстий. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М. 1984. – 417 с.
3. Jui Pin Hung, Wei-Zhu Lin Investigation of the Dynamic Characteristics and Machining Stability of a Bi-rotary Milling Tool // Advances in Science and Technology Research Journal. 2019. Vol. 13. P. 14-22.
4. Krol O., Sokolov V. Development of models and research into tooling for machining centers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 3. P. 12-22.
5. Kenneth H. Huebner, Donald L. Dewhirst, Douglas E. Smith, Ted G. Byrom. The finite element method for engineers. New York, 2021, 107 p.
6. Fish J., Belytschko T. A First Course in Finite Elements. New York : Wiley, 2007, 336 p.
7. Шлаев К.И., Сабиров Ф.С. Исследование динамических характеристик угловой фрезерной головки // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 3 – С. 62-66.
8. В.Н. Костюков, А.П. Наumenко Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.

## МЕТОД ГОМОТОПНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ В СРЕДАХ С ПЛОСКОЙ СИММЕТРИЕЙ

О.Э. Яремко

МГТУ “СТАНКИН”, Москва, Россия

127055, Вадковский переулок, 3а

Tel.: (+7 499)972-42-55, e-mail: [yaremki8@gmail.com](mailto:yaremki8@gmail.com)

**Аннотация.** Идея гомотопного анализа при решении многоточечных краевых задач реализована для определения операторов преобразования. Решение многоточечной краевой задачи для уравнения Лапласа представляется суммой ряда, слагаемые которого есть решения задач Дирихле, взятые с определенными весами. Аналогично, решение краевой задачи для уравнения Лапласа в правой полуплоскости с внутренними условиями сопряжения выражается через решения ряда последовательных задач Дирихле. Нелокальная краевая задача погружается в однопараметрическое или многопараметрическое семейство краевых задач. Это семейство в предельных случаях содержит в себе рассматриваемую краевую задачу и модельную задачу Дирихле. Найдено решение нелокальных многоточечных краевых задач для уравнения Лапласа в правой полуплоскости, решение многоточечных краевых.

**Ключевые слова.** Нелокальные краевые задачи, гомотопный анализ, оператор преобразования, внутренние граничные условия .

Математические модели, возникающие при исследовании ряда прикладных задач, приводят к необходимости решения нелокальной краевой задачи для уравнений математической физики [1, 2, 4, 5]. Основные результаты теории нелокальных краевых задач можно найти в известной работе Скубачевского А.Л. [4]. Одним из источников задач с нелокальными интегральными условиями для уравнений в частных производных были работы А.В. Лыкова [6], посвященные моделированию процессов тепломассообмена. Цель настоящего исследования является развитие теории операторов преобразования как метода гомотопического анализа и применение его к решению нелокальных краевых задач для уравнения Лапласа в областях с плоской симметрией. В нашей работе уточняется понятие оператора преобразования для решения краевых задач теории потенциала. В качестве примера рассмотрим задачу Дирихле для уравнения Лапласа в правой полуплоскости

$$\begin{aligned} \bar{u}_{xx}'' + \bar{u}_{yy}'' = 0, 0 < x, -\infty < y < \infty = 0, 0 < x, -\infty < y < \infty, \\ \bar{u}(0, y) = g(y). \end{aligned}$$

а также нелокальные краевые задачи для уравнения Лапласа

$$u''_{xx} + u''_{yy} = 0, 0 < x, -\infty < y < \infty, \} \quad (1)$$

$$u(0, y) - \Gamma u(x, y)|_{x=0} = g(y), \quad (2)$$

где

$$\Gamma u(x, y) = \sum_{j=1}^n \alpha_j u(x + l_j, y), l_1 < l_2 < \dots < l_n, \alpha_j \in (0, 1), \alpha_j \in (0, 1).$$

Оператор преобразования устанавливает изоморфизм [5] краевых задач (1), (2). В нашем случае оператором преобразования является оператор  $\Gamma$ . Оператор  $\Gamma$  преобразует гармоническую функцию в полуплоскости в гармоническую функцию, а нелокальные граничные условия преобразует в граничные условия Дирихле.

Метод гомотопического анализа [1] представляет собой полуаналитический метод решения нелинейных уравнений в обыкновенных или частных производных. Метод гомотопического анализа использует концепцию гомотопии из топологии для создания решения сходящегося ряда для нелинейных систем. Это становится возможным благодаря использованию гомотопического ряда Маклорена для учета нелинейностей в системе. Метод гомотопического анализа [3] удобен для построения операторов преобразования [5].

Рассмотрим задачу Дирихле для уравнения Лапласа в полуплоскости (1). Рассмотрим также однопараметрический набор нелокальных краевых задач для уравнения Лапласа в правой полуплоскости

$$u''_{xx} + u''_{yy} = 0, 0 < x, -\infty < y < \infty, \} \\ u(0, y) - q\Gamma u(x, y)|_{x=0} = g(y).$$

Заметим, что при  $q=0$  мы получаем задачу Дирихле (1), а при  $q=1$  получаем многоточечную краевую задачу (1)-(2). Решение краевой задачи (1)-(2) получим в виде разложения Маклорена по степеням  $q$

$$u(x, y) = \tilde{u}(x, y) + \sum_{j=1}^{\infty} \tilde{u}_j(x, y)q^j.$$

В этом случае члены ряда Маклорена определяются по итерационной формуле как решения задачи Дирихле

$$\tilde{u}_j''_{xx} + \tilde{u}_j''_{yy} = 0, 0 < x, -\infty < y < \infty, \\ \tilde{u}_j(0, y) = \Gamma \tilde{u}_{j-1}(x, y)|_{x=0},$$

При значении  $q=1$  получаем решение краевой задачи (2) в виде

$$u(x, y) = \tilde{u}(x, y) + \sum_{j=1}^{\infty} \tilde{u}_j(x, y).$$

Метод гомотопического анализа можно применить для решения краевых задач для уравнения Лапласа в правой полуплоскости

$$u''_{xx} + u''_{yy} = 0, x \in (0, l) \cup (0, \infty), -\infty < y < \infty,$$

с краевым условием Дирихле

$$u(0, y) = g(y), u(l, y) = g(y),$$

с внутренними условиями сопряжения на прямой  $x = l$

$$u(l-, y) = u(l+, y),$$

$$\lambda_1 u'(l-, y) = \lambda_2 u'(l+, y).$$

Краевая задача (1)-(2) может быть вложена в однопараметрическое семейство краевых задач вида

$$u''_{xx} + u''_{yy} = 0, x \in (0, l) \cup (0, \infty), -\infty < y < \infty,$$

$$u(0, y) = g(y)$$

$$u(l-, y) = u(l+, y),$$

$$(1 - q\kappa)u'(l-, y) = (1 + q\kappa)u'(l+, y),$$

где

$$\kappa = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}.$$

Решение данной однопараметрической задачи получается разложением в ряд Маклорена по степеням  $q$

$$u(x, y) = \tilde{u}(x, y) + \sum_{j=1}^{\infty} \tilde{u}_j(x, y)q^j$$

где неизвестные гармонические функции  $\tilde{u}_j(x, y)$  однозначно определяются по итерационными формулами

$$\tilde{u}'_j(l+, y) - \tilde{u}'_j(l-, y) = \kappa \left( \tilde{u}'_{j-}(l+, y) + \tilde{u}'_{j-1}(l-, y) \right),$$

$$\tilde{u}_j(l+, y) - \tilde{u}_j(l-, y) = 0, \tilde{u}_j(0, y) = 0.$$

Непосредственно проверяется, что для функций  $\tilde{u}_j(x, y)$  справедливо явное представление

$$\tilde{u}_j(x, y) = \tilde{u}(x + 2lj, y) - \tilde{u}(-x + 2lj, y), 0 < x < l, -\infty < y < \infty,$$

$$\tilde{u}(x + 2lj) - \tilde{u}(x - 2l + 2lj), 0 < x < l, -\infty < y < \infty.$$

Для решения задачи с нелокальными граничными условиями получим формулу

$$u(x, y) = \tilde{u}(x, y) + \sum_{j=1}^{\infty} (\tilde{u}(x + 2lj, y) - \tilde{u}(-x + 2lj, y)) \kappa^j q^j,$$

$$0 < x < l, -\infty < y < \infty,$$

$$\tilde{u}(x, y) = \sum_{j=1}^{\infty} (\tilde{u}(x + 2lj) - \tilde{u}(x - 2l + 2lj)) \kappa^j q^j, l < x, -\infty < y < \infty,$$

При выборе параметра  $q=1$  получаем решение задачи с внутренними граничными условиями.

### Список литературы

1. Carroll R. Transmutation Theory and Applications. North Holland, 1986.
2. Gilbert R., Begehr H. Transformations, Transmutations and Kernel Functions. Vol. 1,2.- Longman, Pitman, 1992.
3. Liao, S.J. Beyond Perturbation: Introduction to the Homotopy Analysis Method, Boca Raton: Chapman and Hall/ CRC Press, 2003.
4. Skubachevskii A. L. Nonclassical boundary value problems. Journal of Mathematical Sciences, V.155, No. 2, 2008, 199–334.
5. Yaremko O.E. Transformation operator and boundary value problems, Differential Equation, Vol.40, N0.8, 2004, pp.1149-1160.
6. Лыков А. В. Тепломассообмен: (Справочник). 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.

# АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ В РЕЖИМАХ С ОБОСТРЕНИЕМ И ИХ АППРОКСИМАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИ ОБУЧЕННЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ

А.С. Мягков

МГТУ «СТАНКИН, Москва, Россия»

127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: (+7 926)883-31-29, e-mail: almyagkov99@yandex.ru

Математическое моделирование сложных линейных и нелинейных систем представляет собой сложную задачу. Нахождение точных аналитических решений ДУЧП и решение краевых задач зачастую сопряжено с серьезными трудностями. Поэтому в последние годы активное развитие получили методы конечных разностей и конечных элементов. Их логическое продолжение – физически информированные (обученные) нейронные сети (PINN-сети).

Применение подобных НС позволяет решать прямую и обратную задачи поиска аналитико-численного решения как линейных, так и нелинейных ДУЧП. Поскольку подобные сети являются НС с глубоким обучением, то они позволяют получать в целом, точные численные аппроксимации, вытесняя традиционные разностные схемы. Обратная задача [1-2] состоит в нахождении параметров искомой математической модели (уравнения), например, коэффициента вязкости, массы, коэффициента теплопроводности и т.д.

При этом, несмотря на наличие огромного числа работ [3-6] и множества программных имплементаций алгоритмов глубокого обучения, их применение лимитировано, особенно, если проводится анализ не классических решений, или же математических моделей, для которых не решена задача существования гладких решений, непрерывных в некоторой области.

Особое место занимают автомодельные решения некоторых нелинейных задач, или же анализ режимов с обострением. Решения краевых задач являются асимптотическими, а предельные переходы осуществить можно не всегда [7-8]. Автомодельные решения хорошо себя зарекомендовали и позволяют рассматривать ряд задач и исследовать свойства решений не только с позиции математики, но и четко формулировать физическую интерпретацию. Подобные математические модели описывают процессы горения, обмена тепла в ударных процессах, где фронт волны, может спадать очень быстро [7-8], и важным аспектом является вопрос локализации тепла на определенной площадке. Квазилинейные параболические уравнения интенсивно изучаются и в рамках теории диссипативных структур.

Однако, в силу особенностей постановки краевых задач, численные методы могут давать результаты с большой погрешностью, или не обладают сходимостью, при этом это могут быть как классические разностные схемы, так и конечно-элементные. PINN-сети требуют обучения на некотором наборе уже полученных решений, поэтому их применение ограничено. Рассмотрим некоторые задачи, в которых наблюдаются такие режимы, анализируются автомодельные решения.

**Задача 1. Уравнение теплопроводности с начальным условием в форме точечного источника.**

Рассмотрим классическую одномерную задачу теплопроводности

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad u(x, 0) = \delta(x) \quad (1)$$

Автомодельную переменную будем искать в виде  $\xi = x^\alpha \cdot t^\beta$ . Масштабирование переменных не должно изменять вид уравнения (1), т.е. если положить, что решение отыскивается методом разделения переменных  $u'(x, t) = vu(x, t)$ ,  $x' = \lambda x$ ,  $t' = \mu t$ . Подставив в уравнение (1)  $u'(x, t)$ , и полагая, что коэффициент  $v$  может быть любым при  $\mu = \lambda^2$  получаем, что  $\lambda^\alpha \mu^\beta = x^\alpha \cdot t^\beta = 1$ , откуда  $\beta = -1/2$ ,  $\alpha = 1$ . Для определения коэффициента  $v$  воспользуемся одним из свойств  $\delta$ -функции  $\delta(ax) = 1/a\delta(x)$ . Строблирующее свойство позволяет из начальных условий получить, что  $v = \lambda$ . В силу записи  $u'(x, t)$  получаем, что  $\lambda = 1/\sqrt{(t)}$ ,  $v = 1/\sqrt{(t)}$ , а следовательно решение может быть записано в виде:

$$u(x, t) = \frac{f(\xi)}{\sqrt{t}}.$$

Сделаем автомодельную подстановку в уравнение. Запишем уравнение теплопроводности с использованием автомодельной подстановки

$$\xi \frac{df(\xi)}{d\xi} + f(\xi) \frac{d^2 f(\xi)}{d\xi^2} = \frac{d^2 f(\xi)}{d\xi^2}$$

Получили обыкновенное дифференциальное уравнение. Его решение имеет вид:

$$f(\xi) = (erf((1/2)i\xi)C_1 + C_2)exp((-1/4)\xi^2)$$

Первую постоянную интегрирования найдем из условия, что на бесконечности решение и его первая производная должны обращаться в 0. таким образом  $C_1 = 0$ . Вторую постоянную интегрирования находим из предельного представления  $\delta$ -функции. Откуда получаем, что  $C_2 = 1/(2\pi^{1/2})$ . Автомодельное решение уравнения теплопроводности с точечным начальным условием имеет вид:

$$u(x, t) = \frac{1}{2} \frac{exp\left(-\frac{x^2}{4t}\right)}{\sqrt{t}\sqrt{\pi}}.$$

Автомодельное решение описывает диффузионное расплывание, при этом точечное воздействие источника переводит процесс обмена в режим с обострением, так как при неограниченном росте  $t \rightarrow \infty$ , площадь под графиком сохраняется, т.е процесс протекает достаточно быстро.

Попытаемся решить задачу с применением PINN-сетей. Запишем нейронный оператор для нашей задачи:

$$\mathcal{N}: (\hat{u}(x, t)) \mapsto u(x, t)$$

Поиск наилучшего (оптимального) решения основан на минимизации функции стоимости (или функции потерь), которая представляет собой функционал:

$$J(\theta_{NN}) = MSE_u + MSE_f. \quad (4)$$

Среднеквадратичные ошибки вычисляются в соответствии с формулами:

$$MSE_u = \frac{1}{N_u} \sum_{i=1}^{N_u} |\hat{u}^i - u(x_u^i, t_u^i)|^2, \quad (5)$$



$$MSE_f = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} |f(x_f^i, t_f^i)|^2. \quad (6)$$

Здесь  $u(x_u^i, t_u^i)$  представляют обучающие данные для начальных и граничных условий,  $u(x_f^i, t_f^i)$  являются обучающими данными для пространственно-временной области,  $f$  – функция остаток регрессии. Поскольку начальным условие является идеальный точечный источник, то может возникнуть проблема при определении нейронного оператора. Эта особенность исключается тем, что начальное условие записывается равным единицей с некоторой нормирующей константой, чтобы разностный оператор сходился. Число куранта в этом случае меньше единицы, поэтому данная разностная схема нейронного оператора будет сходиться к точному решению.

Сравним точное аналитическое решение в момент времени  $t = 1$  (поскольку уже при данном значении  $t$ ,  $u(x, t) \rightarrow 0$ ). На рис.1.а представлен график тепловой карты поверхности для аналитического решения, на рис.1.б – результат аппроксимации нейронным оператором. Набор данных для обучения составлял 50 численных реализаций решения ДУЧП с использованием неявной схемы.

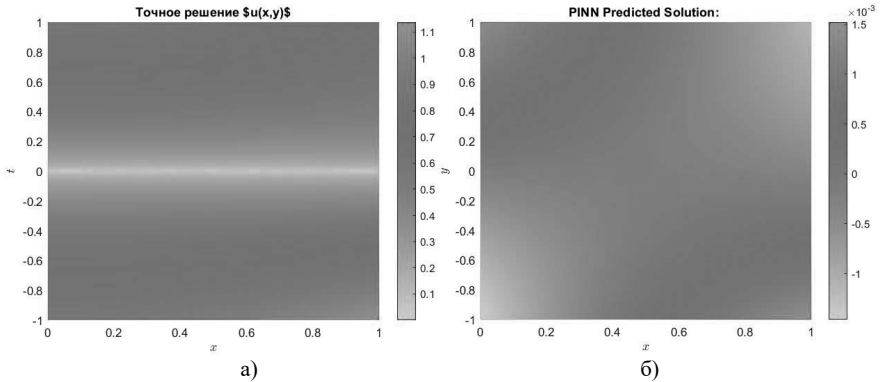


Рис.1 Автомодельное решение задачи (1) и ее аппроксимация PINN-сетями.

Оценкой погрешности аппроксимации выступает значение нормы  $L^2 = 0.6$ . Весьма сильное расхождение обусловлено наличие выбросов в регрессионном члене функции потери. При этом хорошо заметно, что аппроксимация не является удовлетворительной. Вероятной причиной может служить малая обучающая выборка, а также запись начального условия в разностной схеме нейронного оператора.

## Задача 2. Краевая задача с бесконечными пределами.

Рассмотрим следующую краевую задачу для нелинейного уравнения теплопроводности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \left( k_0 u^\sigma \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial x}, \quad -\infty < t < T, \quad x \geq 0 \\ u(-\infty, x) &= 0, \quad x \geq 0 \\ u(t, 0) &= A_0 (T - t)^n, \quad -\infty < t < T \end{aligned}$$

Автомодельное решение данной задачи имеет вид:

$$u_A(x, t) = A_0(T - t)^n \cdot f(\xi), \quad \xi = \frac{x}{k_0^{1/2} A_0^{\sigma/2} (T - t)^{(1+n\sigma)/2}} \geq 0$$

где  $f(\xi) \geq 0$  представляет собой решение дифференциального уравнения:

$$\left( f(\xi)^\sigma \frac{d}{d\xi} f(\xi) \right)' - \left[ \frac{(1+n\sigma)}{2} \right] \xi \frac{d}{d\xi} f(\xi) + n \cdot f(\xi) = 0, \quad 0 < \xi < \infty, \quad f(0) = 1, f(\infty) = 0.$$

Таким образом функция  $f(\xi)$  имеет вид:

$$f(\xi) = \begin{cases} \left( 1 - \frac{\xi}{\sigma^{1/2}} \right)^{1/\sigma}, & 0 < \xi < \xi_0 = \sigma^{-1/2} \\ 0, & \xi > \xi_0 \end{cases}$$

Отметим, что данная краевая задача не может быть аппроксимирована нейронным оператором, поскольку граничные условия заданы на бесконечности, что формально не позволяет записать разностную схему нейронного оператора. Для построения нейронного оператора также потребуется использовать жесткие функции активации, а их поведение в точка разрыва также требует тщательного анализа.

### **Выводы:**

В данной работе рассмотрен вопрос численной аппроксимации PINN-сетями некоторых автомодельных решений ДУЧП, моделирующих режимы с обострением. Асимптотический характер решений не позволяет формально корректно записать нейронный оператор и начальные и граничные условия на полуинтервалах. Показано, что даже решение простейшей автомодельной задачи можно получить только при использовании большого набора обучающих данных и с вводом ряда допущений, критичных при анализе точной аппроксимации.

### **Список литературы**

1. Guo, Yanan & Cao, Xiaoqun & Bainian, Liu & Gao, Mei. (2020). Solving Partial Differential Equations Using Deep Learning and Physical Constraints. Applied Sciences. 10. 5917. 10.3390/app10175917.
2. Jagtap, Aмеya & Kharazmi, Ehsan & Karniadakis, George. (2020). Conservative physics-informed neural networks on discrete domains for conservation laws: Applications to forward and inverse problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 365. 113028. 10.1016/j.cma.2020.113028.
3. Raissi, Maziar & Perdikaris, Paris & Karniadakis, George. (2017). Physics Informed Deep Learning (Part II): Data-driven Discovery of Nonlinear Partial Differential Equations.
4. Raissi, Maziar & Perdikaris, Paris & Karniadakis, George. (2017). Physics Informed Deep Learning (Part I): Data-driven Discovery of Nonlinear Partial Differential Equations.
5. T. Ye, X. Wang, J. Davidson, and A. Gupta, "Interpretable intuitive physics model," in Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018, pp. 87–102.
6. Han, Jiequn & Jentzen, Arnulf & Ee, Weinan. (2017). Solving high-dimensional partial differential equations using deep learning. Proceedings of the National Academy of Sciences. 115. 10.1073/pnas.1718942115.
7. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений / А. А. Самарский, В. А. Галактионов, С. П. Курдюмов, А. П. Михайлов. - Москва : Наука, 1987. - 476, [1] с. : ил.; 23 см.; ISBN
8. Курдюмов С. П. Режимы с обострением. М.: Физматлит, 2006. ISBN 5-9221-0768-2.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА КОНИЧЕСКОЙ ФРЕЗЫ С ЛОПАТКОЙ ИМПЕЛЛЕРА ПРИ ПЯТИОСЕВОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Петр Пивкин<sup>1,2</sup>, Владимир Гречишников<sup>1,2</sup>, Артём Ершов<sup>1,2</sup>,  
Людмила Уварова<sup>1,3</sup>, Михаил Прус<sup>1</sup>, Антон Язев<sup>1,2</sup>,  
Владимир Кузнецов<sup>1,2</sup>, Алексей Надыкто<sup>1,3</sup>.

<sup>1</sup> Лаборатория Технологий Микрообработки, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

<sup>2</sup> Кафедра Инструментальной Техники и Технологий Формообразования, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия

<sup>3</sup> Кафедра Прикладной Математики, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия

**Abstract.** Обработка поверхностей сложной формы таких как лопатки и импеллеры является важной и значимой при производстве изделий авиакосмической и автомобильной промышленности. Известно, что условие формообразования поверхности заключается в общей нормали, с одинаковым углом наклона относительно статичной инструментальной системы координат в точке касания обрабатываемой поверхности и инструмента, чтобы векторы нормалей в точке контакта между обрабатываемой поверхностью и поверхностью инструмента были коллинеарные. При этом точки с общей нормалью могут находиться на отдалённом расстоянии, что приведет к подрезу или недорезу. Для преодоления данных трудностей и выполнения условий формообразования предложены методы численного и аналитического поиска общих нормалей, однако данные подходы неточны и как правило имеют низкую точность при обработке поверхностей с небольшой кривизной. В данной работе решается задача создания поверхности равноудаленной от обрабатываемой поверхностью с идентичными характеристиками угла наклона касательной в воспроизводимых при резание сферическим торцем контрольных точках.

## Введение

В современном машиностроении важную роль играют высокотехнологичные эффективные процессы производства изделий сложной формы [1-5]. Одним из наиболее сложных процессов на стадии технологической подготовки производства является высокоскоростного многокоординатного фрезерование [6-9].

В области формообразования поверхностей импеллера одни данные могут быть излишними другие наоборот недостаточными для обеспечения необходимой точности. Сам по себе объект формообразования реализуется множеством способов в отличие от закрытых полостей сложной формы [10]. Для унифицированных моделей сложных поверхностей существует небольшое количество возможных схем обработки [11-14], тогда как в импеллерах и винтах таких решений может быть огромное множество [15-23], поэтому в данном исследовании оценивалась возможность минимизации требования на стадии контроля и технологической подготовки производства.

Существует методы совершенствования технологии многокоординатной фрезерной обработки за счет совершенствования траектории движения инструмента

повышения точность обработки [24, 25], снижение нагрузки при резании [26]. Существует два основных типа формообразования сложных поверхностей: с точечным контактом инструмента [27] и заготовки, например обработка сферической фрезой поверхности и с контактом по линии в случае обработки поверхности за один проход [28]. Обработка с контактом по линии является наиболее предпочтительной в связи с повышенной жесткостью, объемом и скоростью съема материала в единицу времени, увеличением стойкости режущего инструмента. Оценки качества формообразуемой поверхности традиционно определяется путем определения ошибки между исходной инструментальной поверхностью, полученной решением обратной задачи профилирования и спроектированной поверхностью изделия. В связи с этим можно сформировать критерий на фрезерный инструмент, поскольку для соблюдения высокоточного допуска с минимальной погрешностью при обработке не развёртывающихся линейчатых участков фрезерный инструмент должен сходиться к прямую линию в контакте в взаимном относительном движение инструмента и заготовки. Известно, что условие формообразования поверхности заключается в общей нормали, с одинаковым углом наклона относительно статичной инструментальной системы координат в точке касания обрабатываемой поверхности и инструмента, чтобы векторы нормалей в точке контакта между обрабатываемой поверхностью и поверхности инструмента были коллинеарные [29]. При этом точки с общей нормалью могут находиться на отдалённом расстоянии, что приведет к подрезу или недорезу. Для преодоления данных трудностей и выполнения условий формообразования предложены методы численного и аналитического поиска общих нормалей, однако данные подходы неточны и как правило имеют низкую точность при обработке поверхностей с небольшой кривизной [30]. Поэтому в данной работе решается задача создания поверхности равноудаленной от обрабатываемой поверхностью с идентичными характеристиками угла наклона касательной в воспроизводимых при резание сферическим торцем контрольных точках.

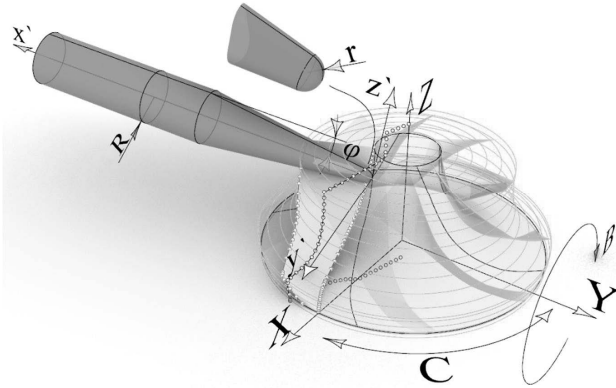
## Методология

Определение траектории 5-ти координатной обработки для высокоскоростного многокоординатного фрезерования реализован за счет регулировки ориентации и позиционирования конической фрезы для обеспечения обработки лопатки без зарезов с контролем в профилирующих сечениях к опорным поверхностям заготовки вдоль траектории инструмента, а также повышение плавности путем создания гладкой касательной при выходе фрезы из контакта. Схема обработки в системе координат импеллера показана на рисунке 1, где  $X, Y, Z$  – три оси линейного перемещения фрезы;  $C, B$  – два поворота вокруг осей  $OY$  и  $OZ$  соответственно. Данные движение установлены таким образом, чтобы минимизировать время адаптации управляющих программ под различные компоновки фрезерных станков с ЧПУ.

Формирование согласованных движений осуществляется поэтапно. Первый блок аналитических моделей формирует взаимосвязь между движением и двумя перемещениями, а второй блок обеспечивает два согласованных поворота с данным движением. Так как система обработки кадров универсально сформирована в системе координат детали рассмотрим возможность компенсации абсолютных движений.

В результате получения совокупности точек на лопасти импеллера обеспечим непрерывность исходных данных поверхности интерполяцией B-сплайном, по набору

точек формируем непрерывные линии интерполяции граничных кривых лопатки рабочего колеса и дна канавки, образуя coordinated movements XYZ:



**Рис. 1.** Схема-графическое описание постановки задачи метода компенсации ошибок при контроле винтовых поверхностей.

$$F_{xy}(v) = \sum_{i=0}^n \left( \left( \prod_{j=\Sigma}^{j\Sigma^{Max+1}} \text{if} \left( i \neq j, \left( \frac{v-X_{1j}}{X_{1i}-X_{1j}}, 1 \right) \right) \cdot Y_{1i} \right); \quad (1)$$

$$F_{xz}(v) = \sum_{i=0}^n \left( \left( \prod_{j=\Sigma}^{j\Sigma^{Max+1}} \text{if} \left( i \neq j, \left( \frac{v-X_{1j}}{X_{1i}-X_{1j}}, 1 \right) \right) \cdot Z_{1i} \right); \quad (2)$$

В представленном концепте компенсацию движения необходимо осуществлять по повороту В с коррекцией угла С, так как компоновки фрезерных многокоординатных станков рассчитываются на реализацию данных поворотов посредством, поворотного стола с двумя последовательными механическими элементами реализации движения.

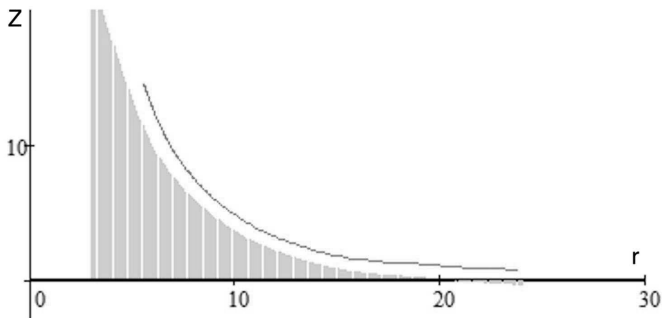
Уравнение линии пересечения эквидистант при обработке поверхностей сложной формы имеет вид:

$$X(vt) = -(Yw) + vt - \frac{\frac{ZXd(vt) \cdot \frac{d}{dvt} ZXd(vt) + \frac{d}{dvt} ZXd7(vt) \cdot XYd(ZXd(vt)) \cdot \left| \frac{X_0 - ZXd(vt)}{dX_0} \cdot \frac{d}{dX_0} XYd(X_0) \right|}{\sqrt{ZXd(vt)^2 + XYd(ZXd(vt))^2}}}{\left( \frac{ZXd(vt) \cdot \frac{d}{dvt} ZXd7(vt) + \frac{d}{dvt} ZXd(vt) \cdot XYd7(ZXd(vt)) \cdot \left| \frac{X_0 - ZXd(vt)}{dX_0} \cdot \frac{d}{dX_0} XYd(X_0) \right|^2}{\sqrt{ZXd(vt)^2 + XYd(ZXd(vt))^2}} \right)^2} + (1);$$

$$Y(vt) = \frac{\sqrt{XYd(ZXd(vt))^2 + ZXd(vt)^2} + R}{\sqrt{\left(\frac{ZXd(vt) \frac{d}{dvt} ZXd(vt) + \frac{d}{dvt} ZXd(vt) \cdot XYd(ZXd(vt)) \cdot \left| \frac{X_0 - ZXd(vt)}{dX_0} \cdot XYd(X_0) \right|^2}{\sqrt{ZXd(vt)^2 + XYd(ZXd(vt))^2}}\right)^2 + (1)}} \cdot \sin\left(\frac{XYd(ZXd(vt)) + R}{ZXd(vt)}\right);$$

$$Z(vt) = \frac{\sqrt{XYd(ZXd(vt))^2 + ZXd(vt)^2} + R}{\sqrt{\left(\frac{ZXd(vt) \frac{d}{dvt} ZXd(vt) + \frac{d}{dvt} ZXd(vt) \cdot XYd(ZXd(vt)) \cdot \left| \frac{X_0 - ZXd(vt)}{dX_0} \cdot XYd(X_0) \right|^2}{\sqrt{ZXd(vt)^2 + XYd(ZXd(vt))^2}}\right)^2 + (1)}} \cdot \cos\left(\frac{XYd(ZXd(vt)) + R}{ZXd(vt)}\right).$$

где  $vt$  – параметр,  $ZXe(v)$ ,  $XYe(ZXe(v))$ ,  $XYd(ZXd(v))$ ,  $ZXe(v)$ ,  $ZXd(v)$  – B-сплайны, описывающие профилирующие линии лопасти импеллера, поверхность дна импеллера и поверхность лопатки. График эквидистантной линии в радиальном масштабе представлен на рисунке 2.



**Рис. 2.** Совокупности точек, лежащих в середине области в фокусной плоскости, наложенные на исходное изображение.

В результате оценки плавности изменения угла расположения фрезы можно сделать вывод, что предлагаемый метод может быть использован не только для решения задачи написания программ для многоосных фрезерных станков.

## Заключение

В статье разработана модель формирующая условия формообразования линии с совокупностью общих нормалей по линии эквидистанты. Была решена задача создания поверхности равноудаленной от обрабатываемой поверхностью с идентичными характеристиками угла наклона касательной в воспроизводимых при резание сферическим торцем контрольных точках формообразования.

## Благодарности

Авторы проводили исследования на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ "СТАНКИН".

Выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10353 (<https://rscf.ru/project/22-79-10353/>)

## References

1. Пивкин, П. М. Технология изготовления цельной конструкции резца для обработки торцевых канавок сложной формы / П. М. Пивкин // Вестник МГТУ "Станкин". – 2016. – № 4(39). – С. 40-46.
2. Design of Toroid-Shaped Solid Ceramic End Mill / V. Grechishnikov, S. Grigoriev, P. Pivkin [et al.] // EPJ Web of Conferences : Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2019), Moscow, 15–17 октября 2019 года. – EDPsciences: EDPsciences, 2019. – P. 05001. – DOI 10.1051/epjconf/201922405001.
3. Гречишников, В. А. Инструментальная система для обработки торцевых канавок на станках с ЧПУ / В. А. Гречишников, А. Р. Маслов, П. М. Пивкин // Вестник машиностроения. – 2015. – № 8. – С. 16-19.
4. High-precision method for determining the optimal trajectory of movement of a conical grinding wheel relative to the helical groove of solid ceramic mills / S. N. Grigoriev, P. M. Pivkin, M. A. Volosova [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 3, Virtual, Online, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 115401E. – DOI 10.1117/12.2574389.
5. A new method for modeling edges of a toroidal cutting surface of solid ceramic end mills / P. M. Pivkin, M. A. Volosova, I. V. Minin [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 3, Virtual, Online, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 115401G. – DOI 10.1117/12.2574391.
6. Выбор шага смещения формообразующего контура при трохоидальном фрезеровании паза концевыми фрезами / В. А. Гречишников, Ю. Е. Петухов, П. М. Пивкин [и др.] // СТИН. – 2017. – № 4. – С. 21-23.
7. Shah, Aash & Agarwal, Ankit & Mears, Laine. (2023). Tool wear area estimation through in-process edge force coefficient in trochoidal milling of Inconel 718. *Manufacturing Letters*. 35. 391-398. 10.1016/j.mfglet.2023.08.072.
8. Korpysa J, Zagórski I, Weremczuk A, Habrat W. Process Stability Analysis during Trochoidal Milling of AZ91D Magnesium Alloy Using Different Toolholder Types. *Applied Sciences*. 2024; 14(9):3616. <https://doi.org/10.3390/app14093616>
9. Jasco, A., Sikarwar, B.S., Phanden, R.K. et al. Optimisation of tool path shape in trochoidal milling using B-spline curves. *Int J Adv Manuf Technol* 121, 3801–3816 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09527-z>
10. Grigoriev, S. N., Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Petukhov, Y. E., Volosova, M. A. and Nadykto, A. B., “High-precision method for determining the optimal trajectory of movement of a conical grinding wheel relative to the helical grooves of solid ceramic mills,” *Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence V*; and *Advanced Manufacturing Technologies for Micro- and Nanosystems in Security and Defence III*, M. Farsari, J. G. Rarity, F. Kajzar, A. Szep, R. C. Hollins, G. S. Buller, R. A. Lamb, M. Laurenzis, A. Camposo, L. Persano, L. E. Busse, M. Dušek, P. M. Alsing, M. L. Fanto, and R. Zamboni, Eds., 48, SPIE, Online Only, United Kingdom (2020) doi:10.1117/12.2574389.
11. Li, Guochao & Dai, Lei & Liu, Jiao & Zhou, Honggen & Tian, Guizhong & Li, Lei. (2020). An approach to calculate grinding wheel path for complex end mill groove grinding based on an optimization algorithm. *Journal of Manufacturing Processes*. 53. 99-109. 10.1016/j.jmapro.2020.02.011.
12. Grigoriev, S. N., Grechishnikov, V. A., Volosova, M. A., Jiang, X. and Pivkin, P. M., “Investigation of Technological Parameters for Machining Toroidal Section of Solid Ceramic End Mills,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **971**(2), 022065 (2020) doi:10.1088/1757-899X/971/2/022065.

13. Liu, Xianli & Chen, Zhan & Ji, Wei & Wang, Lihui. (2019). Iteration-based error compensation for a worn grinding wheel in solid cutting tool flute grinding. *Procedia Manufacturing*, 34, 161-167. [10.1016/j.promfg.2019.06.134](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.134).
14. Pivkin, P. M., Ershov, A. A., Fedorov, S. V., Zhed, O. V., Kuptsov, V. R. and Grechishnikov, V. A., "A new method for determining surface roughness based on the improvement of the kinematics of the milling cutter movement during micro-cutting," *Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence VI*, R. C. Hollins, G. S. Buller, R. A. Lamb, and M. Laurenzis, Eds., 36, SPIE, Online Only, Spain (2021) doi:[10.1117/12.2601922](https://doi.org/10.1117/12.2601922).
15. Grigoriev, S. N., Volosova, M. A., Fedorov, S. V., Okunkova, A. A., Pivkin, P. M., Peretyagin, P. Y. and Ershov, A. A., "Development of DLC-Coated Solid SiAlON/TiN Ceramic End Mills for Nickel Alloy Machining: Problems and Prospects," *Coatings* **11**(5), 532 (2021) doi:[10.3390/coatings11050532](https://doi.org/10.3390/coatings11050532).
16. Calleja, A., Bo, P., González, H., Bartoñ, M. and Lacalle, L., "Highly accurate 5-axis flank CNC machining with conical tools," *Int J Adv Manuf Technol* **97**, 1605–1615 (2018) doi:[10.1007/s00170-018-2033-7](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2033-7).
17. Pivkin, P. M., Ershov, A. A., Fedorov, S. V., Zhed, O. V., Kuptsov, V. R. and Grechishnikov, V. A., "A new method for determining surface roughness based on the improvement of the kinematics of the milling cutter movement during micro-cutting," *Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence VI*, Proc. SPIE, Online Only, Spain (2021) doi:[10.1117/12.2601922](https://doi.org/10.1117/12.2601922).
18. Chen, Zhitao & Yue, Caixu & Liu, Xianli & Liang, Steven & Wei, Xudong & Du, Yanjie. (2021). Surface Topography Prediction Model in Milling of Thin-Walled Parts Considering Machining Deformation. *Materials*, 14, 7679. [10.3390/ma14247679](https://doi.org/10.3390/ma14247679).
19. Grigoriev, S. N., Volosova, M. A., Fedorov, S. V., Okunkova, A. A., Pivkin, P. M., Peretyagin, P. Y. and Ershov, A. A., "Development of DLC-Coated Solid SiAlON/TiN Ceramic End Mills for Nickel Alloy Machining: Problems and Prospects," *Coatings* **11**(5), 532 (2021) doi:[10.3390/coatings11050532](https://doi.org/10.3390/coatings11050532).
20. Vavruska, P., Bartos, F. and Pesice, M. "Effective feed rate control to maintain constant feed per tooth along toolpaths for milling complex-shaped parts," *Int J Adv Manuf Technol* **128**, 3215–3232 (2023) doi:[10.1007/s00170-023-12143-0](https://doi.org/10.1007/s00170-023-12143-0).
21. Kong, S., Yan, Y., Zhang, L. and Feng, Q., "Cutter position optimization with tool runout for flank milling of non-developable ruled surfaces," *Int J Adv Manuf Technol* **115**, 2747–2763 (2021) doi:[10.1007/s00170-021-07270-5](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07270-5).
22. Sencer, Burak & Altintas, Yusuf & Croft, Elizabeth. (2008). Feed optimization for five-axis CNC machine tools with drive constraints. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 733-745. [10.1016/j.ijmactools.2008.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2008.01.002).
23. G. Zhong, C. Wang, S. Yang, E. Zheng, and Y. Ge, "Position geometric error modeling, identification and compensation for large 5-axis machining center prototype," *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 89, pp. 142–150, 2015.
24. Zhang, Hainan & Xiang, Sitong & Wu, Cheng & Yang, Jianguo. (2024). Optimal proportion compensation method of key geometric errors for five-axis machine tools considering multiple-direction coupling effects. *Journal of Manufacturing Processes*, 110, 447-461. [10.1016/j.jmapro.2023.12.067](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.067).
25. Bányai, Ágota & Illés, Béla & Glistau, Elke & Coello Machado, Norge & Tamás, Péter & Manzoor, Faiza & Bányai, Tamás. (2019). Smart Cyber-Physical Manufacturing: Extended and Real-Time Optimization of Logistics Resources in Matrix Production. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9, [10.3390/app9071287](https://doi.org/10.3390/app9071287).



26. Kim, Seon-Jae & Lee, Han. (2007). Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 47. 1827-1838. 10.1016/j.ijmactools.2007.04.005.
27. Gonzalez, Haizea & Calleja, Amaia & Lamikiz, Aitzol & Lacalle, Luis. (2020). Manufacturing Processes of Integral Blade Rotors for Turbomachinery, Processes and New Approaches. *Applied Sciences*. 10. 3063. 10.3390/app10093063.
28. Yu, L., Zhong, L. & Wang, Y. Shape optimization of generic rotary tool for five-axis flank milling. *Int J Adv Manuf Technol* 93, 2921–2931 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0750-y>
29. С.П. Радзевич, Формообразование поверхностей деталей : (Основы теории) / Растан, 2001. - 591 с. : ил.; 29 см.; ISBN 5-11-003599-7
30. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. Учебник для вузов. Изд. объединение "Вища школа", 1974 г., 400 с.

УДК 539.214:539.74: 621.9.011

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ ЗАТРУДНЕННОГО  
РАСТЕКАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО СЛОЯ

В.А. Кадымов<sup>1</sup>, Е.Н. Сосенушкин<sup>2</sup>, Е.А. Яновская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский технологический университет -МИРЭА,

<sup>2</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

127055, Вадковский пер. 3а

Tel.: (+7 499)972-42-55, e-mail: elena\_yanovskaya@bk.ru

**Ключевые слова:** вязкопластическое течение, краевая задача, тонкий слой, стесненное растекание полосы, контактное давление.

**Аннотация.** Предложен метод решения задач течения тонкого пластического слоя в упрощенной постановке, позволяющий определить все силовые и кинематические параметры процесса. Представлены примеры.

Рассматриваются медленные неустановившиеся течения тонкого слоя пластического материала между двумя шероховатыми физическими поверхностями сближающихся твердых тел, описываемые системой нелинейных уравнений в частных производных первого порядка [1 – 3]:

$$\operatorname{grad} p = -\frac{2\tau_s}{h(\alpha, \beta, t)} \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{1}{AB} \frac{\partial(hBu)}{\partial \alpha} - \frac{1}{AB} \frac{\partial(hAv)}{\partial \beta} = 0, \quad (2)$$

где предполагается, что  $h = h(\alpha, \beta, t)$ .

При заданном законе сближения внешних тел (т.е. при известной функции  $h = h(\alpha, \beta, t)$  и условии на границе слоя

$$P(\alpha(\mu), \beta(\mu), t) = P_\Gamma(\mu), \quad (3)$$

где  $\tau_s$  – предел текучести пластического материала на сдвиг;

$\mu$  – параметр, меняющийся вдоль контура слоя;

$t$  – время;

$\vec{V}$  – вектор скорости течения на основной поверхности,

$$\vec{V} = -V(\cos\gamma\vec{i} + \sin\gamma\vec{j}),$$

$\gamma = \gamma(\alpha, \beta, t)$  – угол между касательной к линии тока в рассматриваемой точке области течения и осью  $\alpha$ .

Требуется для всех  $t > t_0$  определить законы распределения контактного давления  $P(\alpha, \beta, t)$ , скоростей  $u(\alpha, \beta, t)$ ,  $v(\alpha, \beta, t)$  и форму области  $S_t = S(\alpha, \beta, t)$ , занятой пластическим материалом на основной поверхности, по известной начальной области  $S_0 = S(\alpha, \beta, t_0)$  на основной поверхности в начальный момент времени.

При прессовании и штамповке тонкостенных металлических конструкций часто сталкиваются с задачами, в которых втекание металла в пазы тела инструмента является затрудненным, при этом единственное граничное условие должно ставиться в более общем виде, т. е.  $P_\Gamma = P_\Gamma(\mu)$  заданная функция в точках контура области течения, отличная от постоянной [4 – 7].

В каждой стадии течения задача относительно контактного давления и задача относительно кинематики течения решаются отдельно [8 – 10]. Сначала определяется давление из решения уравнения:

$$F(\alpha, \beta, P, p, q) \equiv \left(\frac{p}{A}\right)^2 + \left(\frac{q}{B}\right)^2 - \Omega^2(\alpha, \beta) = 0 \quad (4)$$

при граничном условии (3). Здесь

$$p = \frac{\partial P}{\partial \alpha}, q = \frac{\partial P}{\partial \beta}, \Omega = \frac{2\tau_s}{h} > 0.$$

Выпишем характеристическую систему уравнений относительно нелинейного дифференциального уравнения (4) в частных производных первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{ds} &= \frac{\cos\gamma}{A}, & \frac{d\beta}{ds} &= \frac{\sin\gamma}{B}, & \frac{dP}{d\alpha} &= \Omega, \\ \frac{d\gamma}{ds} &= \frac{1}{\Omega} \left( -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial \alpha} \sin\gamma + \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial \beta} \cos\gamma \right) + \frac{1}{AB} \left( \frac{\partial A}{\partial \beta} \cos\gamma - \frac{\partial B}{\partial \alpha} \sin\gamma \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $s$  - длина дуги вдоль носителей характеристик  $\alpha = \alpha(s), \beta = \beta(s)$ , так что

$$ds = \sqrt{A^2 d\alpha^2 + B^2 d\beta^2}.$$

При этом условии

$$\frac{dP}{ds} = \Omega > 0,$$

позволяет переписать характеристическую систему обыкновенных дифференциальных уравнений в более удобном виде, выбрав вдоль характеристик в качестве параметра  $P$  вместо  $s$ . В результате реализации характеристической системы область течения покрывается ортогональной сеткой, составленной из линий тока и линий уровня (линий постоянного давления).

В окрестности регулярных точек контура решение задачи (3), (4) равносильно решению следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dP} &= \frac{\cos\gamma}{A\Omega}, \quad \frac{d\beta}{dP} = \frac{\sin\gamma}{B\Omega}, \quad \frac{ds}{dP} = \frac{1}{\Omega}, \\ \frac{d\gamma}{dP} &= \frac{1}{\Omega^2} \left( -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial \alpha} \sin\gamma + \frac{1}{B} \frac{\partial \Omega}{\partial \beta} \cos\gamma \right) + \frac{1}{AB\Omega} \left( \frac{\partial A}{\partial \beta} \cdot \cos\gamma - \frac{\partial B}{\partial \alpha} \sin\gamma \right), \end{aligned} \quad (6)$$

с граничными условиями в точках контура области  $S_t$ :

$$\alpha = \alpha(\mu), \beta = \beta(\mu), P = P(\mu), p = p(\mu), q = q(\mu),$$

в которых  $p(\mu), q(\mu)$  выбираются однозначно, если кроме двух условий в регулярных точках контура

$$\begin{aligned} \frac{dP_\Gamma}{d\mu} &= p \frac{d\alpha}{d\mu} + q \frac{d\beta}{d\mu}, \\ F(\alpha(\mu), \beta(\mu), P(\mu), p, q) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

выполняется еще условие единственности для определения  $p, q$ :

$$\Delta = F_p \beta_\mu - F_q \alpha_\mu \neq 0$$

Отметим, что для определения  $\gamma(\mu)$  используется условие, которое следует из (6)

$$\frac{dP_r(\mu)}{d\mu} = -\Omega \cos \omega(\mu), \quad (8)$$

причем  $\left(\frac{dP}{d\mu}\right)^2 < \Omega^2$ . Здесь  $\omega(\mu) = \angle(\vec{V}^0, \vec{\tau}^0)$  - угол между направлением линии тока  $\vec{V}^0$  и положительным направлением касательной  $\vec{\tau}^0$  в рассматриваемой точке контура:

$$\gamma(\mu) = \pi + [\angle(\alpha, \vec{\tau}^0) - \omega(\mu)].$$

Для определения кинематики течения будем интегрировать уравнение несжимаемости (2), которое вдоль уже найденных характеристических линий принимает вид:

$$\frac{\partial W}{A \partial \alpha} \cos \gamma + \frac{\partial W}{B \partial \beta} \sin \gamma + W \psi + \bar{\omega} = 0 \quad (9)$$

или

$$\frac{dW}{ds} = -W \psi - \bar{\omega}, \quad (10)$$

где  $s$  - длина дуги вдоль носителей характеристик  $\alpha = \alpha(s), \beta = \beta(s)$ .

$$W(s) = h(s) \cdot V(s),$$

$$\bar{\omega} = -\frac{\partial h}{\partial t}; \quad \psi(s) = \frac{1}{AB} \left[ \frac{\partial B \cos \gamma}{\partial \alpha} + \frac{\partial A \sin \gamma}{\partial \beta} \right].$$

Если нам удастся вычислить значение  $\psi(s)$  вдоль носителей характеристик  $\alpha(s), \beta(s)$ , то интегрирование (9) - линейного неоднородного дифференциального уравнения - не составит особого труда. Пусть  $s_0$  - начальное значение параметра в точках контура области течения. В частности, при течении пластического слоя толщины  $h = h(t)$  на плоскости, когда линии тока являются прямыми, ортогональными к контуру области, для  $\psi(s)$  получаем:

$$\psi(s) = -\frac{1}{R(s_0) - s - s_0},$$

где  $R(s_0)$  - радиус кривизны начального уровня (контур области). Согласно методу аналогий с песчаной насыпью [1], полная сила, необходимая для сжатия плоского слоя пластической массы, выражается через объем  $V_0$  однородной песчаной насыпи:

$$P_{\text{общ}} = \int_S P dx dy = \frac{2\tau_s}{hf} V_0, \quad (11)$$

где  $f$  - коэффициент трения песка.

Считая теперь  $\psi = \psi(s)$  известной функцией, проинтегрируем (8):

$$W(s) = h(s) \cdot V(s) = A_0 J_1(s) - J_2(s), \quad (12)$$

где

$$J_1(s) = \exp\left(-\int_{s_0}^s \psi(s') ds'\right), J_2(s) = \int_{s_0}^s \bar{\omega}(s'') \exp\left(-\int_{s'}^s \psi(s') ds'\right) ds'',$$

а постоянная интегрирования  $A_0$  определяется из условия ветвления течения в неизвестных, но определяемых в ходе решения системы (6) точках следа ребра поверхности - давлений.

Рассмотрим примеры.

**Пример 1. Течение тонкого пластического слоя, толщины  $h = h(t)$ , заключенного между параллельно сближающимися плитами.**

Представим слой, занимающий область, симметричную относительно оси  $Ox$ :

$$S = \{(x, y) : |x| < \infty, |y| < a + be^{-x^2}\}, \quad (13)$$

на границе которой задано давление  $P_\Gamma(x) = c - \Omega be^{-x^2}$ . Как известно, линии тока в этом случае являются прямыми, угол наклона  $\gamma(x)$  которых с осью  $Ox$  определяется из условия (8)

$$\frac{dP_\Gamma}{dx} = p + qy'_x,$$

где

$$p = \Omega \cos \gamma(x), \quad q = \Omega \sin \gamma$$

подставляя сюда значения  $p, q, P$ , окончательно получим:

$$2bx e^{-x^2} = \cos \gamma(x) - 2bx e^{-x^2} \sin \gamma(x).$$

Единственное решение последнего уравнения, устраивающее нас при любом значении  $b \geq 0$ , есть  $\gamma(x) = \frac{3\pi}{2}$ , т.е. линии тока совпадают с вертикальными прямыми. Линии уровня при этом будут прямыми, параллельными оси  $Ox$  (рис. 1). Интегрируя систему (6) вдоль характеристик, находим, что  $P(s, x) = P_\Gamma(x) + \Omega s$ . Ось  $Ox$  в силу симметрии области является ребром поверхности давлений. С учетом условия на ребре из (12) определяем кинематику течения:

$$-hV(s, x) = \frac{dh}{dt}(y(x) - s).$$

Из полученного решения следует, что если выбрать на плоскости область указанной формы с вертикальными граничными бортиками высотой

$$z(x) = \frac{fP_\Gamma(x)}{\Omega}$$

и насыпать на нее однородный песок с коэффициентом трения  $f$ , то форма песчаной насыпи в любом сечении будет представлять угол с вершиной в точке  $x = x_0$  с одинаковым наклоном сторон:

$$\frac{dP}{dy} = -\Omega < 0.$$

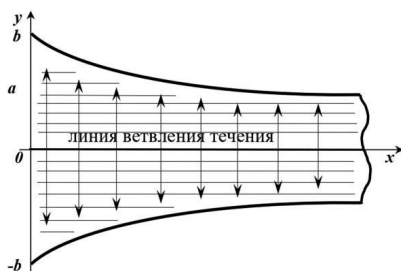


Рисунок 1. Схема направлений течения и линий уровня

**Пример 2. Течение тонкого пластического слоя постоянной толщины  $h = h(t)$ , ограниченного окружностью.**

Запишем уравнение области  $S$ :

$$S = \{(x, y): x^2 + y^2 < R^2\},$$

на которой задано давление:

$$P_r(\varphi) = C - R\Omega \sqrt{\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 1 - 2\frac{r}{R}\cos\varphi}, \quad (14)$$

где

$$x = R\cos\varphi, \quad y = R\sin\varphi$$

- уравнение контура в параметрической форме, а  $r(0 \leq r \leq R)$  фиксированное число.

Подставляя (14) в (8), получим условие для определения  $\omega = \omega(\varphi)$ :

$$-\Omega\cos\omega = \frac{dP_r}{Rd\varphi} = -\frac{\frac{r}{R}\sin\varphi}{\sqrt{\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 1 - 2\frac{r}{R}\cos\varphi}}\Omega,$$

тем самым находится и

$$\gamma(\varphi) = \frac{3\pi}{2} + \varphi - \omega(\varphi).$$

Из характеристической системы (5) следует, что линии тока представляют прямые. Легко показать, что в этом случае ребро поверхности давлений вырождается в единственную точку  $(r, 0)$ , в которой пересекаются линии тока (рис. 2).

Действительно, уравнение носителя характеристик имеет общий вид

$$\begin{aligned} y(x, \varphi) &= y_r(\varphi) - \frac{x - x_r(\varphi)}{\sin(\varphi - \omega(\varphi))}\cos(\varphi - \omega(\varphi)) = \\ &= R\sin\varphi - \frac{x - R\cos\varphi}{\sin(\varphi - \omega(\varphi))}\cos(\varphi - \omega(\varphi)), \end{aligned} \quad (15)$$

так как

$$\sin\gamma(\varphi) = -\cos(\varphi - \omega), \quad \cos\gamma(\varphi) = \pm\sin(\varphi - \omega).$$

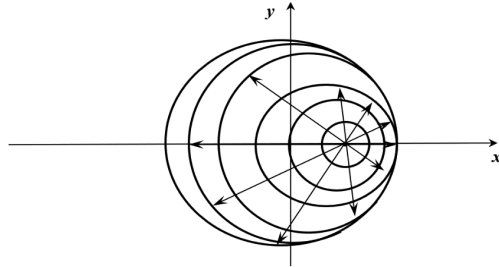


Рисунок 2. Схема вырождения ребра давления в точку.

Подстановка в уравнение (14) значений  $x = r, y = 0$  приводит к тождеству, т. е. для любого значения  $\varphi \in [0, 2\pi]$  точка  $(r, 0)$  лежит на прямой (14). Линии уровня образуют окружность с центром в точке ребра. Характеристическая система (5) имеет решение:

$$\begin{aligned} \gamma(s) &= \gamma_r(\varphi) = \text{const}, \\ x(s) &= x_r(\varphi) + s\cos\gamma(\varphi) = R\cos\varphi + s\cos\gamma(s), \\ y(s) &= y_r(\varphi) + s\sin\gamma(\varphi) = R\sin\varphi + s\sin\gamma(s), \end{aligned}$$

$$P(s) = P_r(s) + \Omega s,$$

Найдем функцию  $\Psi(s)$ :

$$\Psi(s) = -\frac{1}{R(s)} = -\frac{1}{\sqrt{(x(s) - r)^2 + y^2(s)}}$$

Тогда условие несжимаемости (2) вдоль найденных линий тока

$$\frac{dV}{ds} = -V\Psi(s) + \frac{1}{h} \frac{dh}{dt},$$

имеет точное решение

$$V(s) = \frac{1}{h} [J_1(s)A_0 - J_2(s)],$$

где

$$J_1(s) = e^{-\int_0^s \Psi(s') ds'},$$

$$J_2(s) = \int_0^s \left( -\frac{dh}{dt} \right) e^{-\int_s^s \Psi(s') ds'} ds''.$$

Постоянная интегрирования  $A_0$  находится из условия на ребре:

$$V(s = s_{\text{ребра}}) = 0,$$

где

$$s_{\text{ребра}}(\varphi) = \frac{x_p - R \cos \varphi}{\cos \gamma(\varphi)}.$$

Приведем одно следствие полученного решения: предельная поверхность однородного песка, насыпанного на круговую область с выбранной высотой граничных бортиков согласно (14), представляет коническую поверхность с вершиной в точке ребра.

Отметим в заключении, что не составляет особого труда ставить и решать обратную задачу, а именно, в какой зависимости необходимо выбрать высоту бортиков круговой области, чтобы форма поверхности однородной песчаной насыпи представляла конус с вершиной в произвольной точке  $(r, 0)$  внутри круга. Эта задача сводится к интегрированию условия (7) для определения  $P_r(\varphi)$ :

$$\frac{dP_r}{Rd\varphi} = -\Omega \cos \omega(\varphi),$$

где

$$\cos \omega(\varphi) = \frac{\frac{r}{R} \sin \varphi}{\sqrt{\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 1 - 2 \frac{r}{R} \cos \varphi}}$$

Решение последнего уравнения имеет вид (14).

Следует подчеркнуть, что данный подход в постановке и решении обратных задач для восстановления граничных давлений исключает из рассмотрения области с угловыми точками на контуре, точками минимальной кривизны, которые приводят к появлению ребра поверхности давлений, не вырождающейся в точку.

## Литература

[1]. Ильюшин А.А. Труды (1946-1966). Т. 2. Пластичность/ Составители Е.А. Ильюшина, М.Р. Короткина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. -480 с.

- [2]. Кийко И.А. О форме пластического слоя, сжимаемого параллельными плоскостями// Прикладная математика и механика. 2011. Т. 75. Вып. 1.С. 15-26.
- [3]. Кадымов В.А. Математическое моделирование контактных задач пластического течения (монография)/ В.А. Кадымов/ Palmarium Academic Publishing, 2016. – 129 с.
- [4]. Кадымов В.А., Сосенушкин Е.Н., Белов Н.А. Контактная задача о несвободном растекании пластического слоя на плоскости: эксперимент и теория// Сб. науч. трудов Упрругость и неупругость. – М.: МГУ, 2016. – С.180–185.
- [5]. Кадымов В.А., Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А. Некоторые точные решения эволюционного уравнения растекания пластического слоя на плоскости// Вестник Московского ун-та. Сер.1. Математика, механика. –2016. – №3. – С.61–65.
- [6]. Сосенушкин Е.Н., Кадымов В.А., Яновская, Е.А., Гуреева Т.В. Механика выдавливания алюминиевого сплава при штамповке поковки с продольными рёбрами// Цветные металлы. – 2019. – №3. – С.69–75.
- [7]. Кадымов В.А. Эксперименты по стесненной осадке тонкого пластического слоя прямоугольной формы/ В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская/ Моделирование нелинейных процессов и систем. – С. 130 – 136. Материалы шестой международной конференции. – М.: Янус-К, 2023. – 338 с.
- [8]. Кадымов, В.А. Пластические течения в тонком слое: новая постановка краевой задачи и ее решение/ В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская / Сб. тезисов 3-ей междунар. конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем». – М.:Янус-К, 2019. – С.99 – 103.
- [9]. Кадымов, В.А. Экспериментальные исследования по пластической осадке между неподвижными стенками тонких полос в форме прямоугольника и сектора/ В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Н.А. Белов // Известия МГТУ «МАМИ». – №2(16). – 2013. – Т.2. – С.206 – 212.
- [10]. Кадымов, В.А. Контактные задачи пластического течения в тонком слое: теория, постановки краевых задач и их приложения/ В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Е. А Яновская/ Сб. тезисов 5-ой международной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем» (MNPS-2020). – М.: Янус-К, 2021. – С.192 – 196.



## DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DEVICE TO DETERMINE THE VARIATION OF THE THICKNESS OF TREE STEMS

F. R. Freire Carrera  
UTE University, Quito, Ecuador  
Bourgeois y Rumipamba s/n  
Tel.: (+593) 995800212, e-mail: ffreire@ute.edu.ec

J. O. Chimarro Alvear  
Central University of Ecuador, Quito, Ecuador  
Tel.: (+593) 984958011, e-mail: jochimarro@uce.edu.ec

O. Chadrina  
UTE University, Quito, Ecuador  
Bourgeois y Rumipamba s/n  
Tel.: (+593) 998201173, e-mail: olga.chadrina@ute.edu.ec

### INTRODUCTION

Measurements in modern agriculture are essential to obtain valuable information about the growth and development of cocoa trees. The proper management of these crops is achieved through the use of accurate and reliable tools aimed at measuring tree growth [1]. The cultivation of cocoa in Ecuador has taken on great importance in recent years due to its high demand in the international market, reaching in 2020 to be the third most exported product representing 11% of exports [2].

A dendrometer is a measuring device that allows the determination of the diameter of a cylindrical object or structure, such as a tree trunk. It makes measurements by reading with a micrometer or a sensor [3,12]. Dendrometers are especially useful in cocoa plantations, where the trunk diameter is an important measure in determining the amount of fruit that can be harvested. In this context, dendrometers have become an indispensable tool for measuring the diameter and height of cocoa trees [4].

The cocoa plant is very sensitive to water scarcity, therefore irrigation should fluctuate between 1500 – 2500 mm in the warmer low-lying areas and 1200 – 1500 mm in valleys with temperatures around 21 °C and 25 °C respectively [5]. A proper irrigation avoids negative effects on the vital functions of the plant because of water stress. These problems can range from cell turgor, reduced rate of cell expansion, decreased cell wall synthesis, and reduced protein synthesis [6].

### MATERIALS AND METHODS

The development of the device uses a V-shaped methodology. This strategy is suitable for the construction of mechatronic elements since it combines a top-down approach that subdivides the design and requirements of the system into parts and continues with a bottom-up approach which integrates the measurements for the final product. This shows the need for a constant verification/validation between the specified requirements/functions and the actual system [7].

A V-shaped model was chosen and adapted to the environmental, mechanical, economic and operational needs of the device.

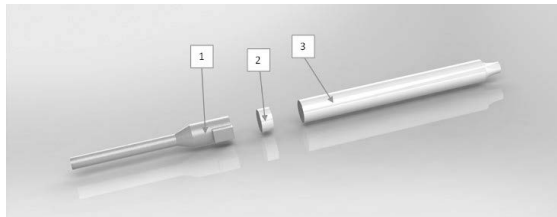
**Hall effect:** when a transverse electric field is generated in the direction of the current flowing through a conductor that is under the action of a magnetic field, the so-called Hall effect is

generated [9]. The KY-024 sensor is based on an effect with the same name, in which a conductor affected by a magnetic field generates a voltage variation. These sensors use semiconductors that replace metals to avoid conductivity and help sensitivity. This type of sensors have an advantage to be used in adverse environments such as humidity, dust and vibration [10].

**Table 1.** Characteristic of KY-024 sensor

Supply	3 to 5 VDC
Digital signal	Integrated
Analog signal	Integrated
Material	PCB
Dimensions	4.0 x 2.6 x 3.2 mm

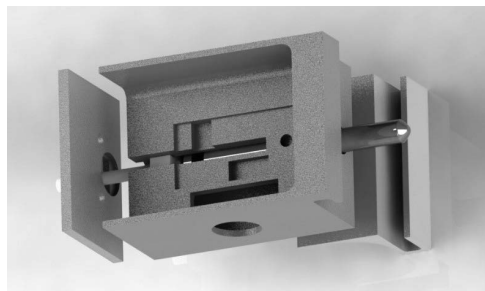
**Point axis system:** the point axis system (see Figure 1) is the main element for data collection since it is responsible for transmitting the expansion and contraction of the stem of cocoa trees. It was designed to avoid the rotation of the magnet and the plastic axis consists of a protruding notch to avoid an erroneous data reading.



**Figure 1.** Point axis system

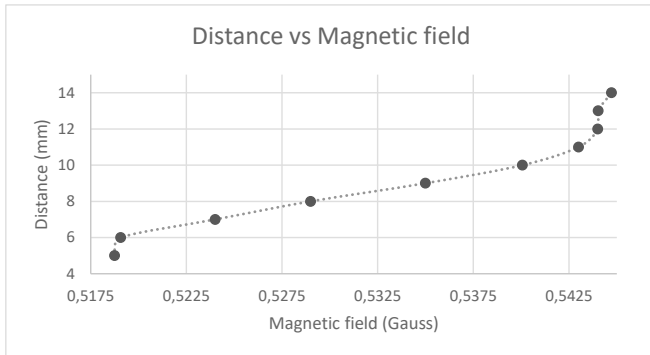
1 – Photopolymer resin shaft, 2 – Neodymium magnet, 3 – steel shaft.

**Support structure:** the design of the support structure (see Figure 2) was developed according to the needs of the project (to obtain this version several previous versions were needed). CAD/CAM software was used for the design and a 3D printer for the creation of the plastic prototype (ABS).



**Figure 2.** Support structure





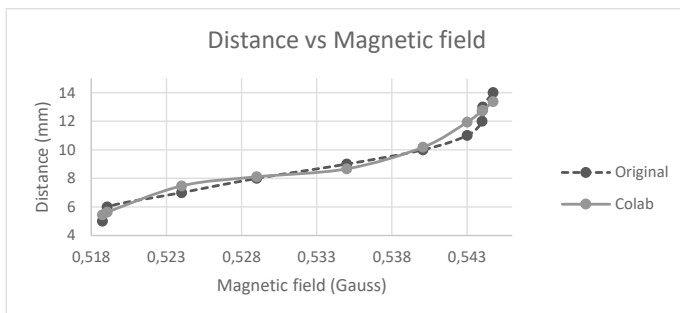
**Figure 5.** Data obtained

The analysis of Figure 5 shows that the distance vs. magnetic field ratio does not represent a linear function. Therefore, using a simple linear regression is not feasible, hence a polynomial regression is adequate to fit the values presented to an equation that can achieve a minimum error with the values obtained.

In previous versions, manual mathematical resources were used to calculate the equation to be implemented. The use of technological resources provided us a better overview at the time of development of the model.

The use of Google Colab allows us to develop shared notebooks in iPython format. In this collaborative environment we can share and edit the information generated for the development of the project [11].

The equation generated by regression (Figure 6) generates an  $R^2$  of 0,97, which concludes that the model generated is adequate to describe the relationship between the variables.



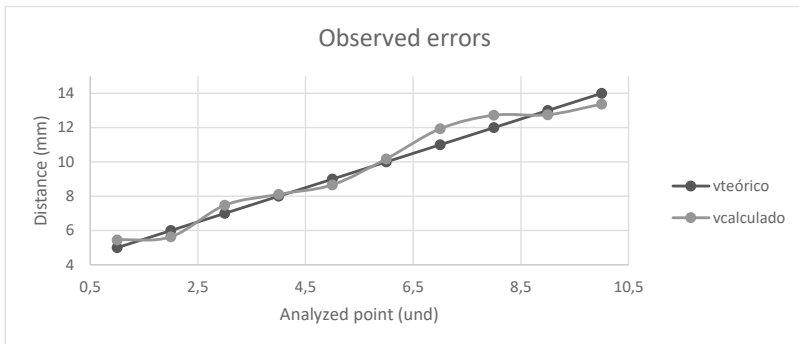
**Figure 6.** Comparison of the generated models

## RESULTS AND DISCUSSION

Controlled tests were carried out to corroborate the functionality of the prototype and the error generated by the measurements (see Table 2). Additionally, it was demonstrated that the equation obtained follows the theoretical values used for the prototype (see Figure 7).

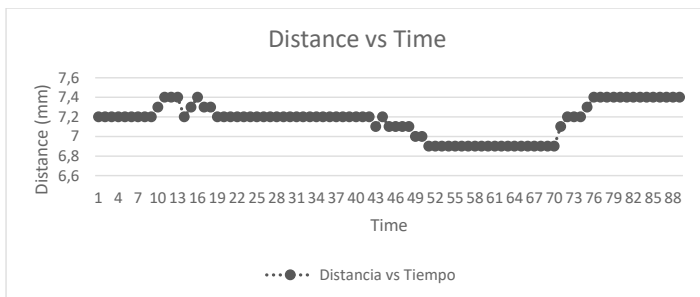
**Table 2.** Distance measurements

Theoretical value	Calculated value	Percentage error
5	5,45435	9,09%
6	5,63582	6,07%
7	7,47364	6,77%
8	8,10904	1,36%
9	8,66701	3,70%
10	10,17957	1,80%
11	11,93119	8,47%
12	12,72344	6,03%
13	12,75174	1,91%
14	13,36885	4,51%



**Figure 7.** Observed errors

Using the obtained model, field tests were carried out with the prototype connected directly to the tree. The expansion and contraction of the trunk were measured, and the first tests of operation of the equipment were taken for about 3 days with an interval of 45 min by data collection (see Figure 6).



**Figure 8.** Real-life data

The observations collected by the equipment over time showed very evident expansions and contractions (see Figure 8).

## CONCLUSIONS

The creation of the model using a computer program optimized the time necessary for the development of the device. It is noteworthy that the errors are higher than those previously obtained, but do not exceed a 10% error. This is an acceptable value, taking into account the modifications made both in design and construction of the device.

The modifications in the device have presented a satisfactory development in functionality optimization, and results, ratifying previous versions of the prototype and its operational functionality only limited by the sensors used.

## REFERENCES

1. Freire Carrera FR, Chadrina O, Moreano Velasco J, Torres Blacio B, Garcia Orellana YDV. Prototype of an automated irrigation system in cocoa trees (*Theobroma cacao*) controlled via the internet with mobile devices. *Av Investig En Ing.* 2019;16(2):93-106.
2. Cambisaca-Díaz M, Macías-Badaraco K. Competitiveness of cocoa exports in Ecuador 2015 – 2020. *Economic Rev.* 7 January 2023;11(1):83-91.
3. Diez JP, Paz MD, Varela SA, Salda GD, Sergeant AS, Meier AM. Practical step-by-step recipe for building low-cost point dendrometers. *Ecol Austral.* 6 July 2020;30(2):220-7.
4. Zelada HC, Rivera RC, Tarqui CEC. Use of dendrometers for irrigation programming in cocoa (*Theobroma cacao*) cultivation at the Sapecho Experimental Station. *Apthapi.* December 2, 2022;8( 3):2433-42.
5. Llerena Mejia Go. Decrease of Water Stress in Cocoa Cultivation (*Theobroma cacao* L.) Through the use of Seaweed the Trunk-Cane [PhD Thesis]. Agrarian University of Ecuador; 2020.
6. Orozco L, López A. Water balance and irrigation requirements in cocoa. *Esquina Téc.* 2016;6(2):1-7.
7. Gausemeier J, Moehringer S. New guideline Vdi 2206-a flexible procedure model for the design of mechatronic systems. In 2003.
8. Sell R, Tamre M. Integration of V-model and SysML for advanced mechatronics system design. 2005.
9. Atorino JI, Bortolín LP, Rodríguez E, Fariás RO, Rodríguez EE. Experiments with a Hall effect sensor. *Lat-AM J Phys Educ.* 2009;3(3):17.
10. Cortés-Cortés JA. Evaluation of sensors for connection to Arduino card. 21 September 2017 (cited 15 March 2023); Available in: <http://tauja.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/7997>
11. Baptista L. Using Python and Google Colab to Teach Physical Chemistry During Pandemic [Internet]. *ChemRxiv*; 2021 [cited 23 March 2023]. Available in: <https://chemrxiv.org/engage/chemrxiv/article-details/60c7548e0f50dba5b9397d43>
12. F. Freire, J. Chimarro. Device for Determining Variations in Stem Thickness of Trees. *ESPOCH Congresses: The EcuadorianJournal of S.T.E.A.M.,* 2023; 3(1), 510–520. DOI 10.18502/epoch.v3i1.14470

# Юбилеи множества Лузина и множества Серпинского в 2024 году

Н.Н. Холщевникова

тезисы доклада на VII Международной научной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем (MNPS - 2023)»

## Аннотация

Рассматривается построение множеств, свойства которых неопределены в ZFC.

## 1 Введение

В 1914г. Н.Н. Лузин вернулся в Москву из длительной зарубежной командировки, во время которой слушал лекции и встречался с выдающимися математиками Европы: А. Лебегом, Ж. Адамаром, Э. Борелем, Э. Ландау, Р. Бэром. Это время явилось преддверием удивительного периода в развитии математики в России, возникновения математической школы Лузина “Лузитании”. Участие в ней принял также польский математик В. Серпинский, эвакуированный в Россию как военнопленный из-за наличия немецкого подданства. Благодаря усилиям научного руководителя Лузина, профессора Московского университета Д.Ф. Егорова и Н.Н. Лузина, Серпинскому было разрешено проживание в Москве и созданы условия для научной работы. Серпинский также принял участие в становлении и работе школы Лузина. Первыми учениками, составившими ядро Лузитании стали Д.Е. Меньшов, П.С. Александров, М.Я. Суслин, И.И. Привалов, В.В. Степанов, А.Я. Хинчин; несколько позже — П.С. Урысон, А.Н. Колмогоров, В.Н. Вениаминов, В.В. Немыцкий, Н.К. Барн, Ю.А. Рожанская, С.С. Ковнер, В.И. Гливенко, Л.А. Лю-

стерник, М.А. Лаврентьев, Л.Г. Шнирельман, затем возникло третье поколение Лузитании: П.С. Новиков, Л.В. Келдыш, Е.А. Селивановский.

## 2 Теоремы Лузина и Серпинского

В 1914г. Н.Н. Лузин [1] доказал следующую теорему.

Теорема Лузина. Если мощность континуума есть алеф-один, то существует в интервале  $(0, 1)$  множество  $E$  мощности континуум такое, что всякое совершенное нигде не плотное в  $(0,1)$ , множество, содержит не более чем счетное множество точек  $E$ . Множества, обладающие таким свойством, называются теперь лузинскими множествами.

А в 1924г. В.К. Серпинским [2] доказана

Теорема Серпинского. Если мощность континуума есть алеф-один, то существует в интервале  $(0, 1)$  множество  $E$  мощности континуум такое, что всякое множество меры 0, содержит не более чем счетное множество точек  $E$ .

Такие множества называются теперь множествами Серпинского.

Высказанное в этих теоремах предположение о мощности континуума называется континуум-гипотезой CH.

## 3 Система аксиом ZFC и дополнительные теоретико-множественные предположения

ZFC = ZF + C, т.е. это система аксиом Цермело-Френкеля плюс аксиома выбора.

1. Первая из аксиом ZFC - аксиома экстенциональности, говорит о том, что множество определяется своими элементами. Формулами это записывается так:

$$(\forall u (u \in X \Leftrightarrow u \in Y)) \Rightarrow X = Y$$

2. Вторая - схема аксиом выделения, это утверждение о том, что существует множество, состоящее из тех и только тех  $x$ , для которых верно  $\varphi(x)$ ::

$$(\forall x (\varphi(x) \Rightarrow x \in y)) \Rightarrow \text{Set}\{x: \varphi(x)\}.$$

Далее следуют аксиомы объединения, степени, схема аксиом подстановки, аксиомы бесконечности и регулярности.



Заключает систему аксиом

8. Аксиома выбора AC:

для каждого множества  $S$ , состоящего из непустых множеств, существует функция выбора на  $S$ , т.е. функция  $f$ , такая что

$$\forall X \in S \quad f(X) \in X.$$

Помимо ZFC в теории множеств и в теории функций используются некоторые дополнительные теоретико-множественные предположения. Прежде всего и ранее всего гипотеза континуума CH, высказанная Г. Кантором в 1878г. и состоящая в том, что мощность континуума это первая несчетная мощность. В предположении CH были доказаны различные теоретико-множественные и теоретико-функциональные предположения Н. Лузиным, А. Зигмундом, В. Серпинским и другими математиками. Однако в то время взаимоотношение CH и ZFC было неясным.

В 1939г. К.Ф. Гедель доказал, что CH совместима с ZFC, а в 1963г. П.Дж. Коэн доказал, что и  $\neg$ CH (отрицание CH) совместимо с ZFC. Коэн ввел новый метод построения моделей — метод вынуждения или форсинг, позволивший открыть новые аксиомы, дополнительные к ZFC. Таким примером является аксиома Мартина MA, введенная в конце 1960-х годов Д. Мартином. Совместимость ее с ZFC и с отрицанием CH была доказана Мартином, Соловеем и Тенненбаумом. Аксиома Мартина выполняется в предположении CH и является нетривиальным обобщением CH. Она не только совместима с отрицанием CH, но в предположении MA между счетной бесконечной мощностью и мощностью континуума может быть как угодно много промежуточных мощностей. Многие проблемы, разрешимые с помощью CH, оказались разрешимыми с помощью только MA. Но нередко, утверждение истинное в предположении CH, ложно в предположении MA +  $\neg$ CH.

## **4 Множество, для которого свойство быть лужинским множеством является неопределенным**

В 1990г. вышла статья В.И. Малыхина [3]. В частности, в этой работе спрашивалось, существует ли несчетное множество, построенное в ZFC,

которое в какой-то модели (при каких-то дополнительных теоретико-множественных предположениях) было бы лужинским.

Пусть вопрос  $S$  о существовании множества класса  $K$ , обладающего свойством  $P$ , неразрешим в  $ZFC$ . Это означает, что при выполнении одних теоретико-множественных предположений или в одной модели  $ZFC$  существует множество класса  $K$ , обладающее свойством  $P$ , а при других предположениях, или в другой модели  $ZFC$  ни одно множество класса  $K$  свойством  $P$  не обладает.

В предположении  $MA + \neg CH$  лужинских множеств не существует. А в предположении  $CH$  сам Лузин построил лужинское множество.

Рассмотрим построение в  $ZFC$ , которое дает пример множества, для которого свойство быть лужинским множеством является неопределенным. Для этого рассмотрим конструкцию множеств на  $[0,1)$ , аналогичную построению Лузина в  $CH$ , которая дает множества с рядом свойств, неопределенных в  $ZFC$ .

Напомним определения идеала множеств и его накрывающей базы.

**Определение 4.1.** Семейство  $J$  подмножеств прямой называют идеалом, если оно наследственное и аддитивное, т.е. если

- 1) из того, что  $B \in J$  и  $A \subset B$  следует, что  $A \in J$
- 2)  $A \in J$  и  $B \in J$ , то  $A \cup B \in J$ .

**Определение 4.2.** Накрывающей базой идеала  $J$  называется такое его подсемейство  $\mathbb{B} \subset J$ , что для всякого  $A \in J$  найдется  $B \in \mathbb{B}$ , такой что  $A \subset B$ .

Пусть  $\mathbb{M}$  - идеал всех нигде не плотных подмножеств из  $[0,1)$ , а  $\mathbb{B}$  - какая-нибудь накрывающая база наименьшей мощности для этого идеала. Обозначим мощность  $\mathbb{B}$  через  $nd$ . Известно, что  $\omega_1 \leq nd \leq c$ .

Вполне упорядочим множество  $\mathbb{B}$  по наименьшему типу  $\mathbb{B} = \{B_\alpha : \alpha < nd\}$ .

Выберем по индукции

$$x_\alpha \in [0,1) \setminus A_\alpha,$$

где

$$A_\alpha = (\cup\{B_\beta : \beta < \alpha\}) \cup \{x_\beta : \beta < \alpha\}$$

для  $\alpha < \omega_1$ .

Так как для  $\alpha < \omega_1$  множество  $A_\alpha$  имеет первую категорию, то в силу теоремы Бэра о категориях множество  $[0,1) \setminus A_\alpha$  непусто и, следовательно, определение элементов  $x_\alpha$  корректно.

Положим  $X = \{x_\alpha : \alpha < \omega_1\}$ .

Рассмотрим следующие вопросы для построенного несчетного множества  $X$ : 1) можно ли доказать, что  $X$  является лузинским множеством? 2) какова категория множества  $X$ ?

В предположении СН множество  $X$  - лузинское, так как с каждым нигде не плотным множеством оно пересекается не более чем по счетному множеству. Действительно, если множество  $A$  нигде не плотно, то  $A \subset B_\alpha \in \mathbb{B}$ , причем  $\alpha < \omega_1$ , и

$X \cap B_\alpha \subset \{x_\beta : \beta < \alpha\}$  - счетное подмножество  $X$ . Следовательно, в предположении СН множество  $X$  не первой категории. В предположении МА +  $\neg$ СН не существует множество Лузина на прямой.

Аналогичное построение дает множество, которое в СН является множеством Серпинского.

В книге [4] приводится модель теории множеств, в которой построенные нами множества с неопределенными свойствами будут множеством Лузина и множеством Серпинского, первой несчетной мощности, а континуум имеет вторую несчетную мощность.

## Список литературы

- [1] N. Luzin, "Sur un probleme de M. Baire", *Comptes Rendus*, 15S (1914), 1258–1261. // Н.Н. Лузин. Собрание сочинений. II том. С.863.
- [2] W. Sierpinski, "Sur l'hypothese du continu", *Fund. Math.*, 5, 177–187, 1924.
- [3] В.И. Малыхин, "Топологические пространства, свойства которых не определены в ZFC", *Сиб. матем. журнал*, т.31, N4. С.105–110.
- [4] T.Bartoszynski, H.Judah, "Set Theory: on the structure of the real line." A.K. Peters, Wellesley, 1995.

**СОДЕРЖАНИЕ**  
**Авторы и названия**

Стр.

<b>S.T. Belyakin</b> USING STOCHASTIC DYNAMIC EQUATIONS IN NEURAL NETWORKS TO DESCRIBE THE BEHAVIOR OF NEURONS IN THE ABSENCE OF ACTIVE POTENTIAL .....	5
<b>E.E. Fomina</b> RECONSTRUCTION OF HUMAN ANTHROPOMETRIC PARAMETERS ON VIDEO FOOTAGE USING NEURAL NETWORKS AND RANDOM FOREST ALGORITHM.....	9
<b>T.V. Karlova, A.Yu Bekmeshov, M.V. Mikhailova, A.E. Tikhomirov</b> SOCIODYNAMIC APPROACH IN INFORMATION SECURITY MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS .....	11
<b>N.M. Kuznetsova</b> MODELING THE LEVEL OF SECURITY OF ENTERPRISE INFORMATION RESOURCES USING THE MONTE CARLO METHOD .....	14
<b>S.D. Liashkov</b> DESCRIPTION OF MOTION OF THE LOW-AMPLITUDE WAVE PACKET IN A WEAKLY NONLINEAR DISCRETE MEDIUM IN THE FRAMEWORKS OF THE ENERGY DYNAMICS.....	16
<b>P.M. Lima, N.V. Chemetov, D. Avitabile</b> ANALYTICAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE NEURAL FIELD EQUATION WITH DIFFUSION .....	21
<b>P.V. Moskalev, L.S. Onishchenko</b> STATISTICAL ESTIMATES OF THE AVERAGE NUMBER OF CLUSTER SITES ON UNIFORMLY WEIGHTED SQUARE LATTICES .....	23
<b>P.V. Moskalev, V.F. Selivanov, L.S. Onishchenko, A.V. Netreba</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF FLOW CHARACTERISTICS FOR POROUS TITANIUM SAMPLES .....	26
<b>Phyo Wai Linn</b> MODIFICATION OF THE PERCOLATION ALGORITHM BY CONSIDERING THE LIQUID-GAS PHASE TRANSITION .....	30
<b>A.V. Shapovalov, A.E. Kulagin</b> SEMICLASSICAL DYNAMICS OF QUASIPARTICLES IN THE NONLOCAL FISHER-KPP MODEL .....	31
<b>E.Yu. Shchetinin</b> ON APPLICATION OF DEEP DIFFUSION MODELS FOR MEDICAL IMAGE ANALYSIS .....	33
<b>O.V. Stikhova</b> HE INDUSTRIAL COMPANIES FACTOR DERIVATIVES MATHEMATICAL CALCULATING MODEL .....	34

<b>I.V. Stepanyan, S.A. Hameed</b> A COMBINED EFFICIENT MODEL OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND EVOLUTIONARY ALGORITHM TO OVERCOME PROBLEMS ACCURATELY.....	37
<b>S.D. Traytak</b> IRREDUCIBLE CARTESIAN TENSORS IN THEORY OF DIFFUSIVE INTERACTION: REVIEW AND NEW RESULTS .....	38
<b>O.S. Yazovtseva, I.M. Gubaydullin</b> SIMULATION OF THE COMBUSTION FRONT DURING THE CATALYST OXIDATIVE REGENERATION.....	40
<b>А.М. Абатурова, Г.Ю. Ризниченко</b> ОЦЕНКА КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ СВЯЗЫВАНИЯ ЦИТОХРОМА С С ЦИТОХРОМОМ С I И III ДЫХАТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ В МОДЕЛИ БРОУНОВСКОЙ ДИНАМИКИ.....	42
<b>Н. Алексич, Б.Алексич, Л.А. Уварова</b> РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В НАНОСУСПЕНЗИЯХ С ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ .....	44
<b>А.Э. Бакир, Ю.А. Повешенко, В.О. Подрыга, П.И. Рагимли</b> ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ С НЕКЛАССИЧЕСКИМ ЗАКОНОМ ДВИЖЕНИЯ В ГИДРАТОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ .....	45
<b>С.А. Беклемишев</b> ПРЕОБРАЗОВАНИЕ БЭКЛУНДА В СОТАХ В БРИЗЕР ТРЕХ СОЛИТОНОВ В МАГНЕТИКЕ.....	50
<b>Д.В. Белова</b> ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ.....	56
<b>О.Д. Бибииков, О.Р. Волкова</b> ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ УРАВНЕНИЯ ВИНЕРА-ХОПФА В СППР ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	59
<b>Е.И. Боброва, И.В. Вякина</b> МЕТОДИКА КЛАСТЕРИЗАЦИИ СУБЪЕКТОВ РФ В ЦЕЛЯХ ОЦЕНКИ. ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	63
<b>Е.А. Буевич, О.Э. Яремко</b> ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ПОТОКОВ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ .....	65
<b>Ву Тунг Лам, О.Р. Волкова</b> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СППР ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ FUZZDIAG.....	71
<b>Е.А. Девятерикова</b> ОБ АППРОКСИМАЦИИ РЕАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ (СМО) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ .....	76

<b>В.С. Дрякина</b> ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ В ДВУСЛОЙНОЙ СРЕДЕ .....	77
<b>А.С. Желнов</b> ПРИМЕНЕНИЕ ВОКСЕЛЬНОЙ ГРАФИКИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ 3D ОБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА.....	79
<b>Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, Е.П. Чухлеб</b> К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ПАРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКОГО ПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ .....	83
<b>Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, Т.Э. Симонова</b> К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ПРОВОДИМОСТИ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ МЕТАЛЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ .....	85
<b>Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, К.Е. Харитонов</b> ЗАВИСИМОСТЬ САМОИНДУКЦИИ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ МЕТАЛЛА ОТ МЕХАНИЗМА ПОВЕРХНОСТНОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ .....	87
<b>Э.В. Завитаев, Т.Э. Симонова, А.И. Уткин</b> РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТОНКОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СЛОЯ В СЛУЧАЕ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	90
<b>Ю.В. Елисеева</b> ИНДЕКС МАСЛОВА В СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ ДЛЯ ГАМИЛЬТОНОВЫХ СИСТЕМ С ОБЩИМИ САМОСОПРЯЖЕННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ.....	93
<b>А. Ершов</b> РАСЧЁТ ПРОФИЛЯ СТРУЖЕЧНОЙ КАНАВКИ ДЛЯ НАЗНАЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ФОРМЫ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ СПИРАЛЬНОГО СВЕРЛА С ТРЕМЯ ЗУБЬЯМИ .....	94
<b>Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян</b> ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ЗОНДИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСА ПРИ ОТРАЖЕНИИ И ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ СРЕДЫ С НЕЛИНЕЙНЫМИ СВОЙСТВАМИ.....	100
<b>Н.Н. Карабутов</b> ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ .....	101
<b>Т.В. Карлова, А.Ю. Бекмешов, М.В. Михайлова, А.Э. Тихомиров</b> СОЦИОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	102
<b>А.Ю. Катков</b> ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ РАСЧЕТЕ КОЛИЧЕСТВА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПРИ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ.....	106

<b>И.И. Колесниченко, Л.М. Балашова</b> МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПАТОГЕНЕЗА ПРОГРЕССИРУЮЩИХ СТАДИЙ РЕТИНОПАТИИ НЕДОНОШЕННЫХ .....	108
<b>М.Д. Коновалов</b> ОБЗОР СИСТЕМ СМЕНЫ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ .....	116
<b>Л.А. Краснобаева, Л.В. Якушевич</b> ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СОЛИТОНОВ В ПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПОЛЕ ПЛАЗМИДЫ PPF1 .....	118
<b>Н.М. Кузнецова</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО .....	120
<b>Т.А. Ла</b> ВЫВОД УРАВНЕНИЯ «ФУНКЦИЯ ТОКА - ВИХРЬ» ДЛЯ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ .....	122
<b>Л.И. Лапушкина</b> ПЛЮСЫ И МИНУСЫ ЕГЭ .....	127
<b>ПХИЬО ВЭЙ ЛИН</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ .....	129
<b>А.Е. Лихинин, Е.М. Красикова</b> МЕТОДЫ ПРЕДОБРАБОТКИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ, ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МОДЕЛЯХ ML.....	135
<b>В.Л.Мальшев</b> КИНЕТИКА МАССОПЕРЕНОСА ИЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЪЕМА ПРИ НАРУШЕНИИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТИ.....	136
<b>П.В. Москалев, Л.С. Онищенко</b> СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ СРЕДНЕГО ЧИСЛА УЗЛОВ КЛАСТЕРА НА РАВНОМЕРНО ВЗВЕШЕННЫХ КВАДРАТНЫХ РЕШЕТКАХ .....	138
<b>П.В. Москалев, В.Ф. Селиванов, Л.С. Онищенко, А.В. Нетреба</b> АНАЛИЗ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОБРАЗЦА ПОРИСТОГО ТИТАНА .....	141
<b>Мохаммад Р.</b> НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕИДЕАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОПУЛ .....	145
<b>А.С. Мягков</b> ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ.....	146
<b>К.М. Назаренко, Н.А. Коробов, Е.С. Назаренко, П.Н. Марков, Д.А. Токарев, А.Б. Надыкто</b> ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИЙ АЛГОРИТМОВ КОНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА .....	151

<b>Ю.А. Незнанов</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕАКЦИЯ-ДИФфуЗИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....	155
<b>С.А. Никитин-Кошкин, К.Э. Никитина-Кошкина, Г.В. Кошкина, Е.Е. Фомина</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОПОЛНЕНИЙ ДЛЯ КОРРЕКТИРОВКИ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ОБЪЕКТОВ НА МЕСТНОСТИ.....	156
<b>К.Э. Никитина-Кошкина, С.А. Никитин-Кошкин, Г.В. Кошкина, Н.А. Стукалова</b> МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА .....	158
<b>А.Н. Николаенко</b> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ХИМИЧЕСКИХ ИНГРЕДИЕНТОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА – ВОДА - РАСТЕНИЯ.....	160
<b>Е.А. Павлов</b> ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЭМУЛЯЦИИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ.....	162
<b>Н.В. Петров, Е.М. Красикова</b> ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ .....	167
<b>С.В. Петухов</b> СВЯЗЬ СИСТЕМЫ ГЕНЕТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ С СЕМЕЙСТВОМ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОДОВ ГРЕЯ .....	168
<b>П.М. Пивкин</b> НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ВИНТОВЫХ КАНАВОК МИКРОФРЕЗ, ИСПОЛЬЗУЯ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ .....	173
<b>Петр Пивкин, Владимир Гречишников, Антон Язев, Артём Ершов, Ольга Надыкто, Людмила Уварова</b> НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ ВИНТОВЫХ КАНАВОК МИКРОФРЕЗ, ОСНОВАННЫЙ НА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ .....	179
<b>Петр Пивкин, Антон Язев</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖУЩИХ КРОМОК НА ПРОИЗВОДЯЩЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	190
<b>Г.В. Плаксунов, Е.М. Красикова</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ РИСКА НА ФОНДОВОЙ БИРЖЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....	196
<b>А.А.Плешков</b> ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОСТИ КАК ВАЖНЕЙШЕГО КОМПОНЕНТА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ .....	198



<b>О.Р. Рагимли</b> МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ В ГИДРАТОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЛЕД-ВОДА .....	199
<b>А.О. Рейтлингер, Л.А. Уварова, Ю.А. Виноградова</b> К ВОПРОСУ О ПОЛУЧЕНИИ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ГЛУБОКОГО КОСМОСА .....	205
<b>О.А. Рожкова, О.В. Новоселова</b> МЕТОДИКА АНАЛИЗА СЕМАНТИЧЕСКОЙ (КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ) МОДЕЛИ.....	206
<b>Е.Ю. Романова, Т.В. Карлова, Л.А. Уварова</b> ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СОЦИО-ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ .....	211
<b>Е.Ю. Романова, Л.А. Уварова</b> АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ БИОНАНОКОМПЛЕКСОВ, СОДЕРЖАЩИХ ИОНЫ d- МЕТАЛЛОВ В АКТИВНЫХ ЦЕНТРАХ .....	217
<b>Т.В. Рыжкова</b> ПОКАЗАТЕЛИ ЭНТРОПИИ ДЛЯ ФИНАНСОВОГО АНАЛИЗА ПРЕДПРИЯТИЯ ENTROPY INDICATORS FOR CORPORATE FINANCIAL ANALYSIS .....	220
<b>Д. М. Силантьев</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ В МОДЕЛИРОВАНИИ МЕЗО- И НАНОСИСТЕМ.....	225
<b>С.А. Синюков, А.Е. Кулагин, А.В. Шаповалов</b> КВАЗИКЛАССИЧЕСКИЕ АСИМПТОТИКИ И НЕВЯЗКА ДЛЯ НЕЛОКАЛЬНОГО КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С КУБИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ .....	229
<b>Г.Е. Смышляев, Е.М. Красикова</b> МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКИХ НЕЙРОНОВ	232
<b>А.В. Соколов</b> ПРИЛОЖЕНИЕ К-ЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ В ОПТИЧЕСКОМ И ДНК КОМПЬЮТЕРАХ.....	235
<b>К.Э. Сосолятина, А.Ю. Мирончик, В.Р. Николаева, Е.А. Девятерикова, Л.А. Уварова</b> НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ПЕРЕДАЧИ ЗАПАХОВ .....	238
<b>О.В. Стихова</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДНЫХ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПАНИЙ.....	239
<b>Н.А. Стукалова, М.А. Смирнова, Г.В. Кошкина, А.А. Гусаров, Д.О. Стукалов</b> АВАРИЙНАЯ СИТУАЦИЯ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ .....	242
<b>Н.А. Стукалова, Г.В. Кошкина, А.А. Гусаров, Д.О. Стукалов</b> ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ.....	243

<b>Т.А. Сушкевич</b> ЭПОХА М.В.КЕЛДЫША: ОТКРЫТИЕ «ЦИФРОВОЙ» И «КОСМИЧЕСКОЙ» ЦИВИЛИЗАЦИЙ. К 300-ЛЕТИЮ АКАДЕМИИ НАУК И 70-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН.....	244
<b>Л.А. Уварова</b> К ВОПРОСУ О СВЯЗИ ИНФОРМАЦИИ И ЭНЕРГИИ .....	268
<b>Р.М. Узиябаев, Ю.А. Повешенко, В.О. Подрыга, С.В. Поляков, Ю.О. Бобренёва, П.И. Рагимли, И.М. Губайдуллин</b> ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ ПЛОЩАДНОЙ ЗАДАЧИ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ В КОЛЛЕКТОРЕ ТРЕЦИНОВАТО-ПОРОВОГО ТИПА .....	270
<b>Ю. Фарах</b> ЭМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССА УНИФИКАЦИИ КАДРОВ ДАННЫХ ПРОТОКОЛОВ ZIGBEE И WIRELESSHART ПО МЕТОДИКЕ «ПОСРЕДНИКИ» .....	275
<b>Н.С. Фналко, М.М. Ольшевец, В.Д. Лахно</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В ДНК ПРИ КОНЕЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ .....	280
<b>В.Д. Хайритдинов, Л.У. Ахметзянова</b> ПРИМЕНЕНИЕ CUDA В ДИЗАЙНЕ ПРАЙМЕРОВ ДЛЯ ПЕТЛЕВОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АМПЛИФИКАЦИИ .....	282
<b>А.И. Черняков, В.О. Подрыга</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ И БАРОСТАТИРОВАНИЯ НА РЕЛАКСАЦИЮ СИСТЕМЫ ПРИ МОЛЕКУЛЯРНО- ДИНАМИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ.....	285
<b>О.Н. Шабловский, И.А. Концевой</b> СТОЯЧАЯ ВОЛНА ВОЗМУЩЕНИЯ ЛИНИИ РОСТА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ .....	289
<b>К.И. Шлаев, Ф.С. Сабиров</b> УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УГЛОВЫХ ФРЕЗЕРНЫХ ГОЛОВОК.....	294
<b>О.Э. Яремко</b> МЕТОД ГОМОТОПНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ В СРЕДАХ С ПЛОСКОЙ СИММЕТРИЕЙ.....	299
<b>А.С. Мягков</b> АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ В РЕЖИМАХ С ОБОСТРЕНИЕМ И ИХ АППРОКСИМАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИ ОБУЧЕННЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ .....	303
<b>Петр Пивкин, Владимир Гречишников, Артём Ершов, Людмила Уварова, Михаил Прус, Антон Язев, Владимир Кузнецов, Алексей Надькто</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА КОНИЧЕСКОЙ ФРЕЗЫ С ЛОПАТКОЙ ИМПЕЛЛЕРА ПРИ ПЯТИОСЕВОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ.....	307

<b>В.А. Кадымов, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская</b> МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ ЗАТРУДНЕННОГО РАСТЕКЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО СЛОЯ .....	314
<b>F.R. Freire Carrera, J.O. Chamarro Alvear, O. Chadrina</b> DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DEVICE TO DETERMINE THE VARIATION OF THE THICKNESS OF TREE STEMS.....	321
<b>Н.Н. Холщевникова</b> ЮБИЛЕИ МНОЖЕСТВА ЛУЗИНА И МНОЖЕСТВА СЕРПИНСКОГО В 2024 ГОДУ .....	327

**Моделирование нелинейных процессов и систем**  
*Материалы 7 международной конференции*

**The modeling of nonlinear processes and systems**  
*The 7 International Scientific Conference (MNPS-2023)*

*Conference proceedings*

*Под редакцией Л.А. Уваровой*

Сдано в набор 30.05.2024. Подписано в печать 06.06.2024  
Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная №1  
Уч.-изд. п.л. 21.25. Физ. п.л. 21.25. Тираж 300. Заказ №2471

Издательство «Янус-К»,  
127411, г.Москва, Учинская ул., д.1

Отпечатано в ООО «ИНФОРМ-СОФТ»  
119034, Москва, Еропкинский пер., д.16

ISBN 5-8037-0943-3



9 1 7 8 5 8 0 3 1 7 0 9 4 3 5