

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ  
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
ХАБАРШЫСЫ**

**HERALD  
OF THE KAZAKH-BRITISH TECHNICAL  
UNIVERSITY**

**ВЕСТНИК  
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Volume 18, Issue 2  
April-June 2021

**ҚАЗАҚСТАН - БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
ХАБАРШЫСЫ**

**HERALD  
OF THE KAZAKH - BRITISH TECHNICAL UNIVERSITY**

**ВЕСТНИК  
КАЗАХСТАНСКО - БРИТАНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Алматы

№ 2 (57)

2021

**Главный редактор – Кулпешов Б.Ш.**

**ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:**

**Акжалова А.Ж., Бисембаев А.С., Пак А.А., Шамои П.С., Исахов А.А.,  
Джумадильдаев А.С., Асилбеков Б.К., Байжанов Б.С., Судоплатов С.В.,  
Баженов Н.А., Бейсенханов Н.Б., Нусупов К.Х., Умаров Ф.Ф., Досболдаев  
М.К., Коробкин В.В., Ивахненко А.П., Ахметжанов А. А., Тургазинов  
И.К., Исмаилов А.А., Кожабеков С.С., Курбатов А.П., Колесников А.В.,  
Буркитбаев М.М., Зазыбин А.Г., Kang Wanli, Сарсенбекұлы Б.**

Издание зарегистрировано Министерством культуры и информации Республики Казахстан.  
Свидетельство о постановке на учет СМИ № 9757 - Ж от 03.12.2008 г.

Журнал зарегистрирован в Международном центре по регистрации сериальных изданий ISSN  
(ЮНЕСКО, г. Париж, Франция)

Подписной индекс - 74206

Издается с 2004 года. Выходит 4 раза в год.

**УЧРЕДИТЕЛЬ**

Казахстанско-Британский технический университет

ISSN 1998-6688

© Казахстанско-Британский  
технический университет, 2021.

# МАЗМҰНЫ

## МҰНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ

<b>Акашева Ж. К., Кудайкулов А.А., Асылбеков Б.К., Болысбек Д.А.</b> Сығылмайтын навье-стокс теңдеуіне арналған проекционды әдісті қолдана отырып өтпелі сфералардан өтетін ағынды кеуек масштабында модельдеу.....	6
--	---

## ХИМИЯ-ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ЖӘНЕ ЭКОЛОГИЯ

<b>Молдагалиева А.А., Кудреева Л.К., Калыева А.Р., Әуелбек Қ.</b> Рений негізіндегі сенсорлар.....	12
---	----

## ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ЖӘНЕ ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР

<b>Ахажанов С.Б., Скоробогатов С.В.</b> Аэродинамикалық бейінде мұзданудың пайда болу шарттары және оларды есептеу әдістемесі.....	20
<b>Джолдасов С.Қ., Янгиев А.А., Рүстем Е.І.</b> Жасанды бұжырлы тезағарлардың жаңа конструкциялары.....	26
<b>Жүмекенов А.</b> Байланыс операторының абоненттік деректерді өңдеудің кешенді тәсілі.....	33
<b>Зиятбекова Г.З., Алиаскар М.С., Абжалилова А.А., Монтаева Д.Н., Турлыбекова А.Н.</b> Тұлғаны бірнеше параметрлер бойынша биометриялық сәйкестендіру.....	39
<b>Исахов А.А., Алимбек А.К.</b> Жылу электр станциясынан химиялық реакция нәтижесінде пайда болатын ауа ластаушыларының таралуын сандық зерттеу.....	45
<b>Исахов А.А., Рахымжанқызы Ф., Өстемірова У.</b> Басты нөмірлеулері бар барлық жерде анықталған функциялардан тұратын шексіз үйірлер.....	53
<b>Исахов А.А., Абылкасымова А.Б., Мансурова М.Е.</b> Кластерлік жоғары параллельді есептеу жүйелерінде жүктемені теңдестіру әдісін қолдану.....	59
<b>Есенова Г. С.</b> Индукциялық қозғалтқыштардың ақауларын анықтау.....	67
<b>Кулпешов Б. Ш., Мустафин Т. С.</b> Омега-категориялық мәліметтер базасының аясында дерлік реттелген сұраныстары туралы.....	73
<b>Тойгожинова А.Ж., Шульц В.А., Күрішбай Н.А.</b> Мұнай сорғы станциясының автоматтандырылған басқару жүйесін құру.....	79
<b>Толегенова Г., Жукабаева Т., Закирова А., Абдилдаева А.</b> Микро желіде мультиагентті жүйелерді қолдануға шолу.....	88
<b>Утепов Е. Б., Тулебекова А. С., Казкеев А. Б., Ошан М. М.</b> Бетонды температуралық-беріктік бақылау әдістерін нормативтік реттеу.....	99

# СОДЕРЖАНИЕ

## НЕФТЕГАЗОВА ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

**Акашева Ж. К., Кудайкулов А.А., Асылбеков Б.К., Болысбек Д.А.**

Поромасштабное моделирование потока жидкости в проницаемых сферах с использованием проекционного метода для несжимаемых уравнений Навье-Стокса.....6

## ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОЛОГИЯ

**Молдагалиева А.А., Кудреева Л.К., Калыева А.Р, Ауелбек К.**

Сенсоры на основе рения.....12

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Ахажанов С.Б., Скоробогатов С.В.**

Условия возникновения обледенений на аэродинамических профиля и методики их расчета.....20

**Джолдасов С.К., Янгиев А.А., Рустем Е.И.**

Новые конструкции быстротоков с искусственной шероховатостью.....26

**Жумекенов А.**

Комплексный подход к обработке событий абонентских данных оператора связи.....34

**Зиятбекова Г.З., Алиаскар М.С., Абжалилова А.А., Монтаева Д.Н., Турлыбекова А.Н.**

Биометрическая идентификация личности по нескольким параметрам.....40

**Исахов А.А., Алимбек А.К.**

Численное исследование рассеивания загрязнителей воздуха в результате химических реакций от тепловой электростанции.....45

**Исахов А.А., Рахымжанкызы Ф., Остемирова У.**

Бесконечные семейства всюду определенных функций с главными нумерациями.....53

**Исахов А.А., Абылкасымова А.Б., Мансурова М.Е.**

Применение метода балансировки нагрузки на высокопараллельных вычислительных кластерных системах.....59

**Есенова Г. С.**

Обнаружение неисправностей асинхронных двигателей.....67

**Кулпешов Б. Ш., Мустафин Т. С.**

О запросах баз данных над почти омега-категоричной упорядоченной областью.....73

**Тойгожинова А.Ж., Шульц В.А., Куришбай Н.А.**

Разработка автоматизированной системы управления нефтеперекачивающей станции.....79

**Толегенова Г., Жукабаева Т., Закирова А., Абдилдаева А.**

Обзор применения мультиагентных систем в микро сети.....88

**Утепов Е. Б., Тулебекова А. С., Казкеев А. Б., Ошан М. М.**

Нормативное регулирование методов температурно-прочностного контроля бетона.....99

# CONTENTS

## OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY

<b>Akasheva ZH.K., Kudaikulov A.A., Assilbekov B.K., Bolysbek D.A.</b> Pore-scale modelling of fluid flow in penetrable spheres using the projection method for incompressible Navier-Stokes equations.....	6
---	---

## CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL SCIENCES, ECOLOGY

<b>Moldagaliyeva A.A., Kudreyeva L.K., Kaliyeva A.R., Auyelbek K.</b> Rhenium based sensors.....	13
---	----

## PHYSICAL, MATHEMATICAL AND TECHNICAL SCIENCES

<b>Akhazhanov S.B., Skorobogatov S.V.</b> Conditions for the occurrence of icing on aerodynamic profiles and methods of their calculation.....	20
<b>Dzholdasov S.Y., Yangiev A.A., Rustem E.I.</b> New fast current designs with artificial roughness.....	27
<b>Zhumekenov A.</b> Complex event processing approach on subscribers' data of telecom operator.....	33
<b>Ziyatbekova G.Z., Aliaskar M.S., Abzhalilova A.A., Montaeva D.N., Turlybekova A.N.</b> Biometric identification of a person by several parameters.....	39
<b>Issakhov A.A., Alimbek A.K.</b> Numerical study of the dispersion of air pollutants as a result of chemical reactions in a thermal power plant.....	46
<b>Issakhov A.A., Rakymzhankyzy F., Ostemirova U.</b> Infinite families of total functions with principal numberings.....	53
<b>Issakhov A.A., Abylkasymova A.B., Mansurova M.Ye.</b> Application of the load balancing method on high parallel computing cluster systems.....	59
<b>Yessenova G. S.</b> Fault detection of induction motors.....	67
<b>Kulpeshov B. Sh., Mustafin T S.</b> On database queries over almost omega-categorical ordered domain.....	73
<b>Toygozhinova A.Zh., Shults V.A., Kurishbay N.A.</b> Development of an automated control system for an oil pumping station.....	79
<b>Tolegenova G., Zhukabaeva T., Zakirova A., Abdildaeva A.</b> Review of multiagents systems application in microgrids.....	88
<b>Uteпов Y.B., Tulebekova A.S., Kazkeyev A.B., Oshan M.M.</b> Normative regulation of methods of temperature and strength control of concrete.....	100

## PORE-SCALE MODELLING OF FLUID FLOW IN PENETRABLE SPHERES USING THE PROJECTION METHOD FOR INCOMPRESSIBLE NAVIER-STOKES EQUATIONS

AKASHEVA ZH.K.<sup>1</sup>, KUDAIKULOV A.A.<sup>1</sup>, ASSILBEKOV B.K.<sup>1</sup>, BOLYSBEK D.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, 050000, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, 050000, Almaty, Kazakhstan

**Abstract.** The direct numerical simulation (DNS) is an effective and useful tool in the two-phase fluid flow studying. The projection method on the staggered grid was applied in this paper to solve the incompressible Navier-Stokes equations in irregular domains at the pore-scale level (irregular boundary is presented by its level-set function). The permeability of porous medium which was constructed by the random positioning of penetrable spheres of equal radii were numerically calculated and validated by comparing with theoretical estimations of permeability based on the numerical solution of the lattice-Boltzmann equation in irregular domains in previous works. All numerical calculations were performed using PARIS simulator.

**Keywords:** Navier-Stokes equations, projection method, porous medium, permeability, porosity

## СЫҒЫЛМАЙТЫН НАВЬЕ-СТОКС ТЕҢДЕУІНЕ АРНАЛҒАН ПРОЕКЦИОНДЫ ӘДІСТІ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ӨТПЕЛІ СФЕРАЛАРДАН ӨТЕТІН АҒЫНДЫ КЕУЕК МАСШТАБЫНДА МОДЕЛЬДЕУ

АКАШЕВА Ж. К.<sup>1</sup>, КУДАЙКУЛОВ А.А.<sup>1</sup>, АСЫЛБЕКОВ Б.К.<sup>1</sup>, БОЛЫСБЕК Д.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті,  
050000, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан

**Аңдатпа.** Тікелей сандық модельдеу (DNS) сұйықтықтың екі фазалы ағынын зерттеуге арналған тиімді және пайдалы құрал болып табылады. Бұл мақалада шахмат торын қолданып проекциялау әдісі кеуек масштабында тұрақты емес аймақтардағы сығылмайтын сұйықтық үшін Навье-Стокс теңдеулерін шешу үшін қолданылады. Радиусы бірдей өткізгіш сфераларды кездейсоқ орналастыру арқылы салынған кеуекті ортаның өткізгіштігі сандық түрде есептелді және басқа жұмыстардағы Больцман торлы теңдеуінің біркелкі емес аймақтардағы сандық шешіміне негізделген өткізгіштіктің теориялық бағалауларымен салыстыру арқылы расталды. Барлық сандық есептеулер PARIS симуляторы бойынша жүргізілді.

**Түйінді сөздер:** Навье-Стокс теңдеулері, проекциялау әдісі, кеуекті орта, өткізгіштік, кеуектілік.

## ПОРОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ПРОНИЦАЕМЫХ СФЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЕКЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ НЕСЖИМАЕМЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

АКАШЕВА Ж. К.<sup>1</sup>, КУДАЙКУЛОВ А.А.<sup>1</sup>, АСЫЛБЕКОВ Б.К.<sup>1</sup>, БОЛЫСБЕК Д.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казахский Национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева, 050000, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский Национальный университет имени аль-Фараби 050000, Алматы, Казахстан

**Аннотация.** Прямое численное моделирование (DNS) - эффективный и полезный инструмент для изучения двухфазного течения жидкости. В данной статье применяется проекционный метод с использованием шахматной сетки для решения уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в нерегулярных областях на поромасштабном уровне (нерегулярная граница представлена функцией установки уровня). Проницаемость пористой среды, которая была построена путем случайного расположения проницаемых сфер равного радиуса, была рассчитана численно и подтверждена путем сравнения с теоретическими оценками проницаемости, основанными на численном решении уравнения решетки-Больцмана в нерегулярных областях в предыдущих работах. Все численные расчеты проводились с использованием симулятора PARIS.

**Ключевые слова:** уравнения Навье-Стокса, проекционный метод, пористая среда, проницаемость, пористость.

### Introduction

There exist many numerical models of the fluid flow in porous media at pore-scale level such as: pore network modelling [1, 2], lattice-Boltzmann method [3, 4] and numerical solution of the Navier-Stokes equations using Finite-Difference, Finite-Element or Finite-Volume method [5, 6, 7].

The most popular approach for computing single and multiphase flow directly on pore-space images is the lattice Boltzmann method. This is a particle-based technique that simulates the motion and collision of particles on a grid; the averaged behavior can be shown to approximate the governing Navier–Stokes equation. The method is relatively easy to code and is ideally suited for parallel computing platforms. Its main disadvantage is computational efficiency, even with a massively parallel implementation. The run time scales approximately as the inverse of real flow rate, which makes it difficult to capture accurately capillary controlled displacement on sufficiently large samples to make reliable predictions of relative permeability. For multiphase flow, network modelling still offers the quickest and most proven approach to predicting relative permeability and capillary pressure [8].

The simulation in this paper is based on the numerical solution of the incompressible Navier-Stokes equations in irregular domains, where the irregular boundary is represented by its level-set function [9, 10, 11]. When the fluid flow obeys Darcy law, the permeability of these porous media was numerically calculated and compared with the previous works based on the numerical solution of the lattice-Boltzmann equation in irregular domains [12].

### Definition of the problem and numerical methodology

There are no exact analytical solutions for porous media which was constructed by the random positioning of penetrable spheres of equal radii, but in this case there are upper and lower estimations of the permeability of these porous media [13, 15]. For the case when the value of the porosity is close to 1, the Brinkman's estimation can be used to obtain exact solution [14].

The fluid flows through this porous medium by the gravitational force and the permeability of these porous medium is numerically calculated and compared with existing theoretical estimations. All numerical calculations were performed using PARIS simulator [16] on the numerical mesh with sizes 256x256x256 and spheres with equal radius  $R=0.0625$  are considered.

The Darcy's law for permeability calculation during the fluid flow through porous medium is:

$$\vec{U} = \frac{K}{\mu} \nabla(p + \rho g z) \quad (1)$$

where  $K$  is the permeability of porous medium,  $\mu$  is the fluid viscosity,  $\vec{U}$  is the flow rate,  $p$  is the pressure in the porous medium and  $\rho g z$  is the hydrostatic pressure.

The model is based on the numerical solution of the Navier-Stokes equations for incompressible fluid flow through porous medium:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}(\vec{x}, t)}{\partial t} + (\vec{u}(\vec{x}, t) \cdot \nabla) \vec{u}(\vec{x}, t) \right) = \rho \vec{g} - \nabla p(\vec{x}, t) + \mu \nabla^2 \vec{u}(\vec{x}, t), \vec{x} \in D_0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}(\vec{x}, t) = 0, \vec{x} \in D_0 \quad (3)$$

No-slip boundary conditions are applied on the pore-matrix interface  $\partial D_0$ :

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = 0, \vec{x} \in \partial D_0 \quad (4)$$

Cubic porous medium domain  $D$  with size  $a$  is considered (square domain for 2D case) and the periodic boundary conditions are applied on its faces:

$$\vec{u}\left(\vec{x}_C - \frac{a}{2}, t\right) = \vec{u}\left(\vec{x}_C + \frac{a}{2}, t\right) \quad (5)$$

where  $\vec{x}_C$  is the position of the center of cubic domain  $D$ .

In order to find the permeability of the porous medium the steady state solution of the equations (2), (3) with boundary conditions (4), (5) is found and this solution is averaged over the porous medium domain:

$$\vec{U} = \frac{\int_D \vec{u}(\vec{x}) dV}{V} \quad (6)$$

and then the Reynolds number ( $Re = \frac{\rho UL}{\mu}$ , where  $L$  is the characteristic length) is found below which the fluid flow in porous medium obeys Darcy's law. When the fluid flow obeys Darcy law, the permeability of the porous medium is numerically calculated using equation (1).

Staggered grid and solid surface are presented on figure 1. Here, cells with same sizes are circumscribed (green dashed lines) around each mesh node.

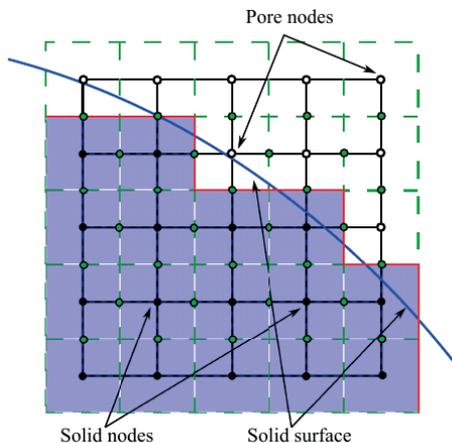


Figure 1 - Representation of staggered grid and solid surface

The theoretical value of the porosity of porous medium which was constructed by the random positioning of penetrable spheres of equal radii is [15]:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{4}{3}\pi R^3 N\right) \quad (8)$$

where  $N$  is the number of spheres and  $R$  is the radius of a sphere. The theoretical value of the solid surface is:

$$S = 4\pi R^2 N \varphi \quad (9)$$

The theoretical estimation of permeability by Brinkman [14] is:

$$K_1^* = \frac{K}{R^2} = \frac{1}{6\pi R^3 N} \left(1 + \frac{3\psi}{4} \left(1 - \sqrt{\frac{8}{\psi} - 3}\right)\right) \quad (10)$$

where  $\psi = 1 - \varphi$  is the volume fraction of the solid phase.

The theoretical estimation of permeability by Weissberg and Prager [13] is:

$$K_2^* = \frac{K}{R^2} = \frac{\varphi}{6\pi R^3 N} \quad (11)$$

### Results and discussion

The results of numerical solution of the Navier-Stokes equations (2, 3) with boundary conditions (4, 5) for fluid flow through the porous media are presented. The following parameters are used: fluid density  $\rho=1$ , fluid viscosity  $\mu=1$ , domain size  $a=1$ .

The relation between flow rate and number of mesh nodes for a fluid flow through porous medium which was constructed by random positioning of penetrable spheres of equal radii  $R=0.0625$  is shown in the table 1.

Table 1. The relation between the flow rate and number of mesh nodes

Number of mesh nodes	Flow rate N=1200, $\varphi=0.337$	Flow Rate N=1600, $\varphi=0.234$	Flow Rate N=2400, $\varphi=0.12$
16x16x16	0.193168	0.104666	0.038771
32x32x32	0.008309	0.00155	3.08241E-19
64x64x64	0.006023	0.001621	6.09677E-05
128x128x128	0.005619	0.001588	0.000108
256x256x256	0.005348	0.001496	0.000116

The comparison of numerical and theoretical values of the porosity and solid surface of porous medium which was constructed by random

positioning of penetrable spheres of equal radii are shown in the figures 2 and 3, respectively.

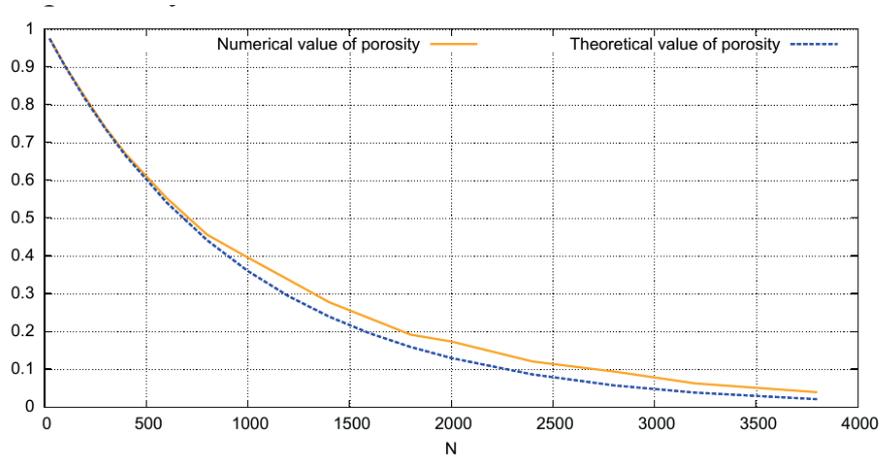


Figure 2 - Comparison of the numerical and theoretical values of the porosity

As can be seen from figure 2 the numerical value of the porosity begins to deviate from the theoretical value when the number of spheres is

$N=1200$  (porosity is  $\varphi=0.337$  and relative error is about 10-15%).

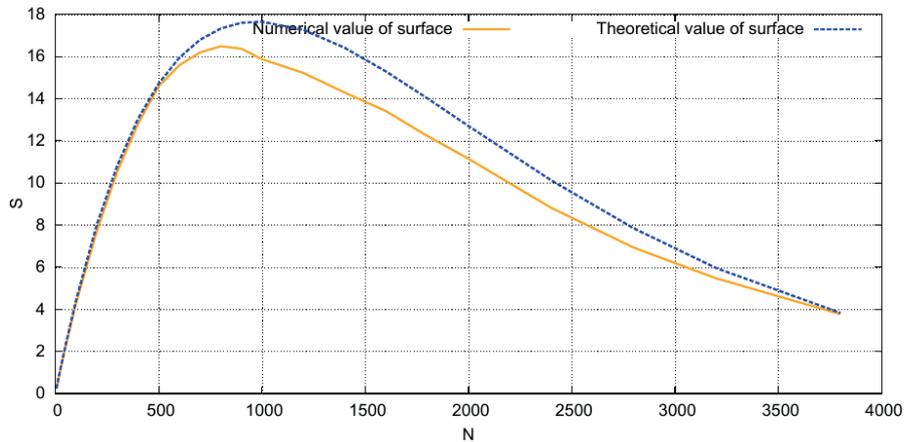


Figure 3 - Comparison of the numerical and theoretical values of solid surface

The maximum relative error of the numerical calculation of the solid surface is about 10-15% when the number of spheres is  $N=1200$  (see figure 3). These errors depend on the mesh size and to calculate these parameters more accurately it needs a very fine numerical mesh or it needs to use unstructured numerical mesh. It is also noteworthy that the relative error of the numerical calculation of the porosity is about 20-30% when the number of spheres is  $N=2400$  (porosity is  $\varphi=0.12$ ).

The comparison of numerical and theoretical values of the permeability of porous medium which was constructed by the random positioning of penetrable spheres of equal radii is shown in the figure 4. The theoretical estimation of Brinkman [14] for dilute concentration of randomly located identical spheres and the theoretical estimation of Weissberg and Prager [13] for the porous medium which was constructed by the random positioning of penetrable spheres of equal radii are considered.

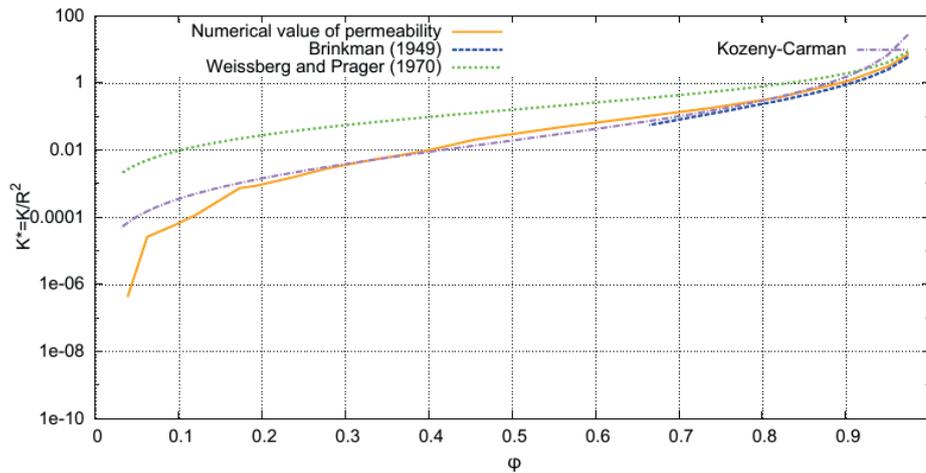


Figure 4 - Comparison of the numerical and theoretical values of the permeability

As it can be seen from the figure 4 the theoretical value of Weissberg and Prager is always greater than the numerical value. The theoretical value of Brinkman begins to deviate from the numerical value when the number of spheres is  $N=200$  (porosity is  $\varphi=0.82$ ).

#### Concluding remarks

The results of the numerical simulation of incompressible viscous fluid flow through porous medium which was constructed by the random

positioning of penetrable spheres of equal radii are presented in this paper. Incompressible Navier-Stokes equations are numerically solved using projection method on staggered grids.

#### Acknowledgment

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP08052055), which is gratefully acknowledged by the authors.

#### REFERENCES

1. J. Koplik. Creeping flow in two-dimensional networks. *J. Fluid Mech.*, 1982, vol. 119, pp. 219-247.
2. H. J. Vogel, J. Tolke, V.P. Schulz, M. Krafczyk and K. Roth. Comparison of a Lattice-Boltzmann Model, a Full-Morphology Model, and a Pore Network Model for Determining Capillary Pressure-Saturation Relationships. *Vadose Zone J.*, 2005, vol. 4, pp. 380-388.
3. D.H. Rothman. Cellular-automaton fluids: A model for flow in porous media. *Geophysics*, 1988, vol. 53, no. 4, pp. 509-518.
4. S. Succi, E. Foti and F. Higuera. Three-Dimensional Flows in Complex Geometries with the Lattice Boltzmann Method, *Europhys. Lett.*, 1989, vol. 10, no. 5, pp. 433-438.
5. A. Lemmer and R. Hilfer. Parallel domain decomposition method with non-blocking communication for flow through porous media. *Journal of Computational Physics*, 2015, vol. 281, pp. 970-981.
6. C. Manwart, U. Aaltosalmi, A. Koponen, R. Hilfer and J. Timonen. Lattice-Boltzmann and finite-difference simulations for the permeability for three-dimensional porous media. *Physical Review E*, 2002, vol. 66, no. 1.
7. S. Geller, M. Krafczyk, J. Tolke, S. Turek and J. Hron. Benchmark computations based on lattice-Boltzmann, finite element and finite volume methods for laminar flows. *Computers & Fluids*, 2006, vol. 35, pp. 888-897.
8. M.J. Blunt, B. Bijeljic, H. Dong, O. Gharbi, S. Iglauer, P. Mostaghimi, A. Paluszny, C. Pentland. Pore-scale imaging and modelling. *Advances in Water Resources*, 2013, vol. 51, pp. 197-216.
9. P.J. Roache. *Computational fluid dynamics*, Hermosa Publishers, 1985, isbn 0-913-47805-9.

10. R. Peyret and T.D. Taylor. Computational methods for fluid flow, 1983, Springer, New York, isbn 978-3-540-13851-8, 978-3-642-85952-6.
11. D.L. Brown, R. Cortez and M.L. Minion. Accurate projection methods for the incompressible Navier-Stokes equations, J. Comput. Phys., 2001, vol. 168, no. 2, pp. 464-499.
12. A. Cancelliere, C. Chang, E. Foti, D.H. Rothman and S. Succi. The permeability of a random medium: Comparison of simulation with theory, Phys. Fluids A, 1990, vol. 2, pp. 2085-2088.
13. H.L. Weissberg and S. Prager. Viscous Flow through Porous Media. III. Upper Bounds on the Permeability for a Simple Random Geometry, Physics of Fluids, 1970, vol. 13, no. 12, pp. 2958-2965.
14. H.C. Brinkman. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles, Appl. Sci. Res., 1949, vol. A1, pp. 27-34.
15. S. Torquato. Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties, 2002, Springer, New York, isbn 0-387-95167-9.
16. S. Zaleski. PARIS simulator code, <http://www.ida.upmc.fr/~zaleski/paris>.

---

### Information about authors:

1. Akasheva Zhibek Kairatovna – Deputy Head of the Research Laboratory «Computational Modeling and Information Technologies» at the non-profit JSC «KazNRTU named after K.I. Satbayev».

Email: [zhibek\\_akasheva@mail.ru](mailto:zhibek_akasheva@mail.ru)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7668-8911>;

2. Kudaikulov Aziz Anarbayevich – PhD, Professor at the non-profit JSC «KazNRTU named after K.I. Satbayev»;

Email: [aziz.kudaikulov@gmail.com](mailto:aziz.kudaikulov@gmail.com)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4389-4097>;

3. Assilbekov Bakytzhan Kalzhanovich – PhD, Head of the Research Laboratory «Computational Modeling and Information Technologies» at the non-profit JSC «KazNRTU named after K.I. Satbayev»;

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0368-0131>;

Email: [assilbekov@mail.ru](mailto:assilbekov@mail.ru)

4. Bolysbek Darezhat Abilseyituly – Researcher at the Research Laboratory «Computational Modeling and Information Technologies» at the non-profit JSC «KazNRTU named after K.I. Satbayev»;

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8936-3921>;

Email: [bolysbek.darezhat@gmail.com](mailto:bolysbek.darezhat@gmail.com)

# ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ И ЭКОЛОГИЯ

ӘОЖ 544.6.018.47-039.7  
МРНТИ 31.15.33

DOI 10.55452/1998-6688-2021-18-2-12-19

## РЕНИЙ НЕГІЗІНДЕГІ СЕНСОРЛАР

**МОЛДАГАЛИЕВА А.А., КУДРЕЕВА Л.К., КАЛЫЕВА А.Р, ӘУЕЛБЕК Қ.**

*Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан*

*Аңдатпа.* Бұл әдеби шолу жұмысында рений негізіндегі электрохимиялық сенсорлардың жұмыстары қарастырылды. Рений негізіндегі сенсорлардың зерттеу жұмыстары бір-бірімен салыстырылып, кесте құрылды. Электрохимиялық және биологиялық сенсорлар дайындау үшін рений негізіндегі жұмысшы электродтардың синтезделу жолдары анықталды. Рений негізіндегі сенсорларды синтездеу үшін термиялық, микротолқынды термиялық тотығу, ультрадыбыс, магнетронды бұрқу, биэкспоненциалды ыдырау әдістері кеңінен қолданылғандығы анықталды. Рений негізіндегі сенсорлардың таңдалынған аналитке қатысты анықтау шегі, сызықтық диапазоны, жауап беру уақыты, сезімталдығы, т.б. негізгі параметрлері салыстырылды. Қарастырылған ғылыми еңбектер нәтижесінде рений негізіндегі сенсорлардағы ренийдің маңызды элемент ретінде таңдалыну себебі жоғары сезімталдыққа, жоғары балқу температурасына (3000 °С-тан жоғары), жылдам реакцияға және төмен шығындарға ие болғандығы деп болжанды. Рений негізіндегі сенсорлардың хош иісті органикалық қосылыстарды, гистаминді, ДНҚ-ны, оттегіні, иондарды, карциноэмбрионалды антигенді, күн сарысын, жылу ағынын және ісік биомаркерін анықтау үшін қолданылғандығы анықталды. Бұл жұмыс рений негізіндегі электрохимиялық сенсорлар туралы ғылыми-зерттеу жұмыстарының қазіргі аспектілері туралы жалпылама ақпарат береді.

*Түйінді сөздер:* рений, рений нанобөлшегі, биосенсор, электрохимиялық сенсор, аналит

## СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ РЕНИЯ

**МОЛДАГАЛИЕВА А.А., КУДРЕЕВА Л.К., КАЛЫЕВА А.Р, АУЕЛБЕК Қ.**

*Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, 050000, Алматы, Казахстан*

*Аннотация:* В данной литературной обзорной работе были рассмотрены работы электрохимических сенсоров на основе рения. Исследовательские работы сенсоров на основе рения были сопоставлены между собой и была составлена таблица. Определены пути синтеза рабочих электродов на основе рения для изготовления электрохимических и биологических сенсоров. Установлено, что для синтеза сенсоров на основе рения широко использовались методы термического, СВЧ-термического окисления, ультразвука, магнетронного распыления, биэкспоненциального разложения. Сравнивались основные параметры сенсоров на основе рения по отношению к выбранному аналиту: предел обнаружения, линейный диапазон, время отклика, чувствительность и др. В результате рассмотренных научных работ предполагалось, что причиной выбора рения в качестве важного элемента в сенсорах на основе рения была высокая чувствительность, высокая температура плавления (выше 3000°С), быстрая реакция и низкие потери. Было обнаружено, что сенсоры на основе рения использовались для определения ароматических органических соединений, гистамина, ДНК, кислорода, ионов, карциноэмбрионального антигена, солнечного желтка, теплового потока и

биомаркера опухоли. Данная работа дает обобщенную информацию о современных аспектах научно-исследовательских работ по электрохимическим сенсорам на основе рения.

**Ключевые слова:** рений, наночастица рения, биосенсор, электрохимический сенсор, анализ

## RHENIUM BASED SENSORS

**MOLDAGALIYEVA A.A., KUDREYEVA L.K., KALIYEVA A.R., AUVELBEK K.**

*Al-Farabi Kazakh National university, 050000, Almaty, Kazakhstan*

**Abstract.** In this literature review, the work of electrochemical sensors based on rhenium was considered. The research work of the rhenium-based sensors was compared with each other and a table was compiled. The ways of synthesis of rhenium-based working electrodes for the manufacture of electrochemical and biological sensors are determined. It was found that the methods of thermal, microwave-thermal oxidation, ultrasound, magnetron sputtering, and bi-exponential decomposition were widely used for the synthesis of rhenium-based sensors. The main parameters of the rhenium-based sensors were compared with respect to the selected analyte: detection limit, linear range, response time, sensitivity, etc. As a result of the reviewed scientific papers, it was assumed that the reason for choosing rhenium as an important element in rhenium-based sensors was high sensitivity, high melting point (above 3000°C), fast response and low losses. It was found that rhenium-based sensors were used to detect aromatic organic compounds, histamine, DNA, oxygen, ions, carcinoembryonic antigen, solar yolk, heat flux, and tumor biomarker. This paper provides a summary of the current aspects of research work on rhenium-based electrochemical sensors.

**Keywords:** rhenium, rhenium nanoparticle, biosensor, electrochemical sensor, analite

### Қысқартылған сөздер

МКҚТ-монокристалды құрылымды талдау  
 МКЕ-монокристалды есептеу  
 ТС-термиялық сәуле  
 бру=4.4'-бипиридин  
 ИЛС-импульсті лазер сәулесі  
 ЦВА-циклді вольтамперометрия  
 БПЫ-биэкспоненциалды ыдырау  
 ТЫ-термиялық ыдырау  
 МБ-магнетронды бүрку  
 ХИОҚ-хош иісті органикалық қосылыс  
 МЦ-металды цикл  
 ИҚС-инфрақызыл спектроскопия  
 УД-ультрадыбыс  
 КЭА-карциноэмбрионалды антиген  
 ЭКТ-электрокаталитикалық тотығу  
 ТТ-термиялық тотығу

### Кіріспе

Сенсор бір немесе бірнеше бастапқы өлшеу түрлендіргіштері бар құрылымдық оқшауланған құрылғы. Сенсор өлшеу ақпаратының сигналын беруге, одан әрі түрлендіру-

ге, өңдеуге және (немесе) сақтауға ыңғайлы, бірақ бақылаушының тікелей қабылдауына болмайтын нысанда шығаруға арналған. Датчиктер экономиканың көптеген салаларында тау-кен және өңдеу, өнеркәсіптік өндіріс, көлік, коммуникация, логистика, құрылыс, ауыл шаруашылығы, денсаулық сақтау, ғылым және басқа салаларда қолданылады. Қазіргі уақытта сенсор техникалық құрылғылардың ажырамас бөлігі болып табылады.

Рений негізіндегі сенсорлар көптеген зерттеуші ғалымдардың қызығушылығын арттыруда. Себебі рений өзінің көптеген қасиеттерінің артықшылығымен әртүрлі салаларда қолданысқа ие бола алатын сенсорлық жүйенің элементі бола алады. Сондықтан да бұл әдеби шолу жұмысында рений негізіндегі сенсорлардың мүмкіншіліктері, артықшылықтары, құрамдық бөліктері келтірілген. Рений негізіндегі сенсорлардың әркелкі салаларда қолданыс табуы көптеген мәселелер қатарын қысқартады. Соның ішінде жылу ағынын дәл өлшеу үшін рений негізіндегі сенсорлық жүйе маңызды рөл атқарады. Өйткені, вольфрам-рений жылу датчигі жоғары

сезімталдықтың, жоғары балқу температурасының, жылдам реакцияның және арзан бағаның артықшылықтарына байланысты металлургияда, аэроғарышта, авиацияда, атом энергетикасында ультра жоғары температураны өлшеу үшін кеңінен қолданылады. [1] зерттеуде вольфрам-рений құймаларын тотығудан қорғау үшін  $ZrO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $ZrB_2$  және  $SiC$  тұратын композициялық жабын қабаты таңдалған. Тотықтырғыш-төзімді жабын қабаты вольфрам-рений термобулы датчигінің бетінде золь-гель әдісі арқылы өсірілді және жабынды қондыру процесі зерттелген. Соңында вольфрам-рений термопарасы тотығу атмосферасында  $2500^\circ C$ -та оттекті ацетилен жалынымен сыналды және термопаралар 1800 секундтан астам уақытта жұмыс істей алатындығы анықталды. Ал [2] зерттеу жұмысында радиожилікті бүрку әдісімен кремний карбиді негізіндегі вольфрам-ренийлі жұқа пленкалы термобулы сенсоры алынғандығы жайлы баяндалған. Тәжірибе көрсеткендей, жабын қабаты шамамен  $600^\circ C$  температурада тотығудан туындаған сенсордың ыдырауын болдырмайды да, суық дәнекерлеу температурасын  $0^\circ C$  деңгейінде ұстап тұрғанда, тұрақты максималды жұмыс температурасын  $1420^\circ C$ -қа дейін арттырды.

Оттегіні анықтау көптеген мәселелерді шешуге мүмкіндік береді. Ренийдің трикарбонил кешені (I) соңғы жылдары өзінің қызықты фотофизикалық және фотохимиялық қасиеттеріне байланысты айтарлықтай назар аударды. Жалпы оттегі сенсорлары океанография, метеорология, экология және биология сияқты бірқатар салаларда қолданылады [3, 4]. Бұл мақалада рений кешенінің синтезі мен люминесцентті қасиеттері ұсынылды. Аргонмен қаныққан ерітінділердегі кванттық сәулелену айтарлықтай артты (әсіресе 590 Нм жолақ үшін). Бұл кешендердің жалғыз оттегі сенсублизаторлары ретінде әрекет ету қабілеті және оларды оттегі сенсорлары ретінде пайдалану үшін зерттелген [5]. [6] зерттеуінде силсесквиоксан пленкасына  $[Re(CO)_3BR]$  кешені енгізілгеннен кейін көптеген фотофизикалық қасиеттері мен  $O_2(^1\Delta_g)$ -ны фотосенсублизациялау қабілетін сақтайтын сенсор

ролін атқара алатынын көрсеткен. Молекулалық оттегінің қатысуымен  $Re(CO)_3Br(PBI-Cab)$  қозған күйінің өмір сүру уақыты  $N_2$  таза атмосферасындағы 5,04 мкс-тен ауа атмосферасында 0,31 мкс-ке дейін айтарлықтай төмендейтіндігін авторлар анықтады. [7] зерттеуінде  $Re(CO)_3(CPO)Br$  кешені оттегіні оптикалық анықтау үшін жасалған. Осылайша динамикалық механизмнен кейін композиттік эмиссия  $O_2$  молекулаларымен сөндірілетіні Лян, Ян, Фенга авторларының зерттеу жұмысында расталды.

### Негізгі бөлім

Фотоэлектрохимиялық сенсорлық жүйе микроэлементтерді, әсіресе күрделі биологиялық жүйеде биологиялық белсенді молекулаларды талдауға мүмкіндік береді. Соның ішінде өтпелі металл дихалькогенидтер қатарына жататын рений дисульфиді ( $ReS_2$ ) керемет электронды, тербелмелі және оптикалық сипаттамаларға ие.  $ReS_2$  осы ерекше қасиеттерге ие болғандықтан, ол электронды құрылғылар өндірісінде соның ішінде фотодетектор, литий-ионды аккумулятор, ең маңыздысы фотоэлектрохимиялық сенсорлық жүйеде кеңінен қолданылады. Ал  $ReS_2$  нано қабаттарына негізделген фотоэлектрохимиялық иммуносенсор әлі күнге дейін ісік биомаркерлерін анықтау үшін маңыздылығы жоғары жүйе ретінде зерттелуде.

[8] зерттеуде ренийдің (I) алкокси-көпірлі бинуклеарлық кешендері Альцгеймер ауруымен бірге жүретін  $\beta$ -амилоидты фибриллалардың агрегациясын селективті және сезімтал анықтау үшін сенсор ретінде қолданылатындығы жайлы баяндалған. Сәулелену қарқындылығының өзгеруімен қатар, нәтижелер бұл кешендерден құрылған сенсорлар біріншіден, ДНҚ-ның жоғары модуляцияланған қасиетін көрсетті, ол әртүрлі диацияларды саралауға мүмкіндік берді. Екіншіден, иондық қоспада селективтілікті көрсете алды. [9]. Үндістанда қант диабетімен ауыратын 50,8 миллион адам тұратыны үлкен мәселені туғызды [10]. Инсулин жоғары температура, төмен рН және т.б. сияқты белгілі-бір

жағдайларда амилоидты фибриллалардың түзілуіне бейім болып келеді. Бұл инсулин фибриллалары инсулиннің қайталанған инъекцияларында байқалатын инсулин амилоидының шөгінділеріне байланысты II типті қант диабетін емдеуге елеулі қауіп төндіреді [11]. Сондықтан амилоидты "жараларды" сезімтал анықтаудың жақсы әдістерін жасау клиникалық диагностика мен терапевтік қолдануда өте маңызды роль атқарады. Соңғы жылдары қант диабетін емдеуге қойылатын талаптардың салдарынан инсулин фибрилляциясын анықтауға қызығушылықтың өсуі байқалады. Авторлар [12] жұмыста классикалық амилоидты Тиофлавин бояуы мен флуоресцентті әдісті қолдана отырып, рений негізіндегі сенсор көмегімен инсулин фибриллаларын анықтау жайлы хабарлаған. Белсенді ИАШ бояғышын (индукцияланған агрегация шығындысы) 1,2 - бис [4-(3 - сульфonatoпропоксил)фенил]-1,2-дифенилэтил тұзы негізіндегі электродты инсулин фибриллаларының сенсоры және ингибиторы ретінде қолдануды көрсеткен. [13]. Бұл ренийлі (I) бинуклеарлық кешендер биомолекулаларға және оптикалық визуализацияға арналған сенсор ретінде фотоэлектрлік қасиеттерге ие екені зерттеу барысында анықталған. Сонымен қатар ұзын алкилді тізбектердің агрегациясы агрегатталған фосфоресценцияның жоғарылау қасиеттеріне және амилоидты фибриллаларды анықтауға арналған сенсорлық жүйеге келтірілген [14]. Ірі қара сарысуындағы альбуминің конформациялық өзгерістерін анықтауға арналған рений (I) негізіндегі флуоресцентті сенсор жайлы зерттелген. Жалпы құрылымы  $[Re(CO)_3(N-N)L]PF_6$  болатын рений (I) кешендерінің ақуыз байланыстыратын қасиеттері (мұндағы  $n-n = 4,4$ -дина-ноил-2,2-бипиридин және  $L = \text{ру-3-COOH}$  және  $\text{ру-3-CONH}_2$ ) бұқаның сарысуы альбуминімен  $pH=7,4$ -те ультракүлгінді сіңіру спектрін қолдана отырып зерттелген [15]. [16] жоғары тұрақты Re нанобөлшектері алғаш рет органикалық еріткіште біртекті төмендету жолымен ДНҚ-ны анықтау мақсатында бөлме температурасында 10 минут ішінде синтезделген. Ал осы синтезделген Re органозолы тоңазытқышта мөрленген кон-

тейнердің астында сақталған кезде 6 айдан астам уақыт бойы өте тұрақтанған.

Бензол, ксилол және толуол органикалық қосылыстар денсаулық үшін созылмалы жағымсыз әсерлерді, соның ішінде астма, аллергия және қатерлі ісік ауруын тудыратыны белгілі. Соған байланысты рений негізінде модификацияланған сенсорлар көптеген ғалымдардың назарын аударған. Бұл жұмыста [17] гистаминді-маңызды биогендік аминді анықтау үшін  $ReO_2$  негізімен модификацияланған гетерогенді көміртекті электродты сенсорды қолдану мүмкіндігі көрсетілген. Бұл әдіс балық тұздығындағы гистаминді анықтауда сәтті қолданылған. [18] зерттеуінде екі алкокси-көпірлі бинадерлік комплекстердің  $[ \{Re(CO)_3(1,4-NVP)\} 2(\mu 2-OR)_2 ]$  (1, R =  $C_4H_9$ ; 2,  $C_{10}H_{21}$  4-лигандпен (1-нафтилвинил) пиридинмен (1,4-NVP) ұзын алкил тізбегінің күшейтілген эмиссиясының сипаттамалары көрсетілген.

Аниондарға арналған жаңа химосенсорлардың дамуы биологиялық, экологиялық және химиялық процестердегі іргелі рөліне байланысты супрамолекулалық химия саласындағы маңызды тақырып болып табылады. [19] зерттеуде авторлар полярланған N-H-ты анықтау мақсатында рений карбонилдерінің бірнеше кешенін зерттеудің соңғы нәтижелерін сипаттаған. Сондай-ақ тиоамидтер мен 2,6-пиридиндикарбонилдихлорид, изофталоилдихлорид және терефталоилдихлорид туындылары синтезделген. [20] зерттеуінде авторлар 2,2'-бипиридин лигандтарының амидті, мочевиалы және тиомочевинді туындылары Re (I) негізіндегі үш кешенді түрлерімен спектрлік әдістер арқылы синтезделгендігі жайлы сипатталған. Бұл кешендер УК және ЯМР спектроскопия әдісімен зерттелген  $CN^-$ ,  $F^-$ ,  $CH_3COO^-$  және  $H_2PO_4^-$  сияқты аниондарды қосқанда айтарлықтай спектрлік өзгерістер көрсететіні анықталды. [21] зерттеуінде тиоамид, мочевиана және тиомочевин лигандтары синтезделген, содан кейін олардың көпірлі ренийдің (I) трикарбонилдиимин кешендері алынған. Тиомочевина негізіндегі кешендер F, Cl және Br сияқты галогендермен айтарлықтай эмиссиялық реакцияларды

көрсеткен. Амидотиомочевина негізіндегі рений (I) кешені сулы және жартылай сулы еріткіштерде цианид аниондарын анықтауда сенсор ролін атқара алатыны нәтижелермен дәлелденген. [22] зерттеу жұмысында авторлар Re(I) иминді функционданған кешендерін жасап шығарған. Авторлар оларды ацетонитрилдегі  $Cu^{2+}$  ионымен селективті байланыстыру арқылы химосенсорлар ретінде қолдануға болатындығын тәжірибе барысында анықтаған. [23] зерттеуінде 2,20-бипиридин лигандтарына қосылған гидроксил және имин топтары бар рений (I) трикарбонил кешендерінің сериясы синтезделген және әртүрлі спектроскопиялық әдістермен сипат-

талған. Бұл кешендер  $Cu^{2+}$  ионы үшін флуоресцентті "қосылатын" химосенсор ретінде қызмет ететіні анықталған. Сенсордың өмір сүру уақыты және Re (I) кешенінің кванттық шығысы  $Cu^{2+}$  ионын қосқанда айтарлықтай артқан. Мұнда сипатталған эксперименттер нәтижелері металл рецепторлары аниондарды қабылдаудың жаңа тәсілдерін жасауға мүмкіндік береді деп болжанған. [24]. Бұл [25] мақалада ренийдің (I) және иридийдің (III) люминесцентті кешендерін иондарға, молекулаларға және биомолекулаларға сенсор ретінде қолдану қарастырылған. Келесі кестеде рений негізіндегі сенсорларды салыстыру келтірілген.

**1-кесте. Рений негізіндегі сенсорларды салыстыру кестесі**

Сенсор электрод беті құрамы	Зерттеу әдісі	Re сенсорды синтездеу әдісі	Аналит	Жауап беру уақыты	Сезімталдығы	Анықтау шегі	Әдебиеттер
$Re(CO)_3(Br-PODZ)BR$	МКҚТ	Допинг	Оттегі	9 с	3,91	-----	[26]
$Re(CO)_3Br(ПБИ)$	МКЕ	ТС	Оттегі	6 с	20,53	-----	[27]
$Re_2(CO)_6(bpy)_2$ (Ду-фен) <sub>2</sub>	Қоспалау	ИЛС	Оттегі	8 с	20,1	-----	[28]
$Re(CO)_3(POP)Br$	ЦВА	БПЫ	Оттегі	5 с	7,07	-----	[29]
W-5Re/W-26Re	Микронды	ТЫ	Жылу ағыны	-----	$3,8 \times 10^{-6}$ В/(кВт/м <sup>2</sup> )	-----	[30]
WRe26-In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SEM, XRD және XPS	ТЫ	Жылу ағыны	-----	201,6 мкВ/К	-----	[31]
Тетра Re МЦ	-----	МБ	ХИОҚ	-----	-----	30 г/л	[32]
4-ОН Re МЦ	ИҚС	-----	Амин	-----	-----	-----	[33]
Сэндвич типті $ReS_2$ нанобөлшегі	-----	УД	КЭА	-----	-----	0,468 пг/мл	[34]
(ReCDAC)	ЭКТ	ТТ	Күн сарысы	-----	91,53 мкА/мкМ	16 Нм	[35]

**Қорытынды**

Барлық зерттеу мақалаларын қорытындылай келе зерттеу жұмысының рений негізіндегі электродтар сенсор ретінде негізінен оттегіні, жылу ағынын, гистаминді анықтауға қолданылғанын байқауға болады. Жалпы ренийдің кешенді қосылыстары сенсордың электродты бөлігіне көбірек пайдаланылғандығы мәлім болды. Рений қосылыстары көбіне термиялық жолмен синтезделген. Бұл жұмыста рений негізіндегі сенсорларға бай-

ланысты мақалалар қарастырылып, сенсорды әзірлеудегі қолданылған әдістер, анықтаушы аналиттер мен оларды анықтау шегі және сызықтық диапазоны бір-бірімен салыстырылды. Рений негізіндегі электродтарды сенсор ретінде қолдану көптеген жылдар бойы қызығушылық тудырып жатқандығы анықталды. Бірақ осындай негіздегі жұмыстар әлі де толықтай зерттеліп, әлемдік зерттеуші ғалымдардың қызығушылығын арттырады деген үмітпенен қорытынды жасауға болады.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. L. Zhang, Y. Peng, J. Zhou, R. Zhang, S. Chen, and X. Yang, “Tungstenrhenium thermocouple sensor for in-situ ultra-high temperature measurement of hypersonic aircraft surface” 2014, pp. 1-5.
2. Zhang, Zhongkai et al. 2019. “Effect of Oxidation on Conductivity Characteristics of Tungsten-Rhenium Thin-Film Thermocouples Sensor.” *Proceedings of the 14th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS 2019*; pp. 114–17.
3. Kuczynska, Paulina, Malgorzata Jemiola-Rzeminska, and Kazimierz Strzalka. 2015. “Photosynthetic Pigments in Diatoms.” *Marine Drugs* 13(9): pp. 5847–81.
4. Papkovsky, B. Dmitri, and I. Ruslan, Dmitriev. 2013. “Biological Detection by Optical Oxygen Sensing.” *Chemical Society Reviews* 42(22): pp. 8700–8732.
5. Valdés, Eliseo et al. 2020. “An Amine Linker Group Modulates Luminescent Properties in a Rhenium (I) Tricarbonyl Complex. How Can It Be Applied for Ratiometric Oxygen Sensing?” *Dyes and Pigments* 172(August 2019): pp. 1077-87.
6. Spada, M. Ramiro et al. 2015. “Clean Singlet Oxygen Production by a ReI Complex Embedded in a Flexible Self-Standing Polymeric Silsesquioxane Film.” *Journal of Physical Chemistry C* 119(18): pp. 10148–59.
7. Liu, Liang, Yan Yang, and Jun sheng Feng. 2017. “Study on a Rhenium Complex Having an Electron-Pulling Ring and Its Oxygen Sensing Application: Synthesis, Characterization and Sensing Performance.” *Sensors and Actuators, B: Chemical* 253: pp. 310–16.
8. Sathish, Veerasamy et al. 2014. 130 Talanta Alkoxy Bridged Binuclear Rhenium (I) Complexes as a Potential Sensor for  $\beta$ -Amyloid Aggregation. Elsevier. pp. 274-279
9. Mullice, A. Lucy, and J.A. Simon, Pope. 2010. “The Development of Responsive, Luminescent Lifetime Probes Based upon Axially Functionalised Fac-[Re(CO)<sup>3</sup>(Di-Imine)(L)]<sup>+</sup> Complexes.” *Dalton Transactions* 39(25): pp. 5908–17.
10. International Diabetes Foundation (IDF), *Diabetes Atlas*, 4th edition, 2010. [77] C. Bryant, D.B. Spencer, A. Miller, D.L. Bakaysa, K.S. McCune, S.R. Maple, A.H. Pekar, D.N. Brems, Acid stabilization of insulin, *Biochemistry* 32 (1993) pp. 8075–8082.
11. J. Mohanty, S.D. Choudhury, H. Pal, A.C. Bhasikuttan, Early detection of insulin fibrillation: a fluorescence lifetime assay to probe the pre-fibrillar regime, *Chem. Commun.* 48 (2012) pp. 2403–2405.
12. N. K.Mishra, K. B. Joshi, S. Verma, Inhibition of Human and Bovine Insulin Fibril Formation by Designed Peptide Conjugates, *Mol. Pharmaceutics* 10 (2013) pp. 3903–3912.
13. V. Sathish, A. Ramdass, Z.Z. Lu, M. Velayudham, P. Thanasekaran, K.L. Lu, S. Rajagopal, Aggregation Induced Emission Enhancement in Alkoxy Bridged Binuclear Rhenium(I) complexes-Application as Sensor for Explosives and Interaction with Microheterogeneous Media, *J. Phys. Chem. B* 117 (2013) pp. 14358–14366
14. V. Sathish, E. Babu, A. Ramdass, Z.Z. Lu, T.T. Chang, M. Velayudham, P. Thanasekaran, K.L. Lu, W.S. Li, S. Rajagopal, Photoswitchable alkoxy-bridged binuclear rhenium(I) complexes – a potential probe for biomolecules and optical cell imaging, *RSC Adv.* 3 (2013) pp. 18557–18566.
15. Bhuvaneswari, Jayaraman, Ayub Khan Fathima, and Seenivasan Rajagopal. 2012. “Rhenium(I)-Based Fluorescence Resonance Energy Transfer Probe for Conformational Changes of Bovine Serum Albumin.” *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 227(1): pp. 38–44.
16. K. Sakthikumar, et al. 2016. “A Highly Stable Rhenium Organosol on a DNA Scaffold for Catalytic and SERS Applications.” *Journal of Materials Chemistry C* 4(26): pp. 6309–20.
17. Veseli, Albana et al. 2016. “Electrochemical Determination of Histamine in Fish Sauce Using Heterogeneous Carbon Electrodes Modified with Rhenium(IV) Oxide.” *Sensors and Actuators, B: Chemical* 228: pp. 774–81.

18. Sathish, Veerasamy et al. 2013. "Aggregation-Induced Emission Enhancement in Alkoxy-Bridged Binuclear Rhenium(I) Complexes: Application as Sensor for Explosives and Interaction with Microheterogeneous Media." *Journal of Physical Chemistry B* 117(46): pp. 14358–66.
19. Chang, Kai Chi, Shih Sheng Sun, and Alistair J. Lees. 2012. "Anion Sensing by Rhenium(I) Carbonyls with Polarized N-H Recognition Motifs." *Inorganica Chimica Acta* 389: 16–28.
20. Ramdass, Arumugam et al. 2013. "Monometallic Rhenium(I) Complexes as Sensor for Anions." *Inorganic Chemistry Communications* 35: pp. 186–91.
21. Odago, Maurice O. et al. 2011. "Thioamide, Urea and Thiourea Bridged Rhenium(I) Complexes as Luminescent Anion Receptors." *Inorganica Chimica Acta* 374(1): pp. 558–65.
22. Ramdass, Arumugam et al. 2017. 240 *Sensors and Actuators, B: Chemical* Luminescent Sensor for Copper(II) Ion Based on Imine Functionalized Monometallic Rhenium(I) Complexes. Elsevier B.V. pp. 1216-1225
23. Ramdass, Arumugam et al. 2015. "Synthesis and Characterization of Monometallic Rhenium(i) Complexes and Their Application as Selective Sensors for Copper(Ii) Ions." *RSC Advances* 5(48): pp. 38479–88.
24. Bhuvaneswari, Jayaraman, Paulpandian Muthu Mareeswaran, Karunanithi Anandababu, and Seenivasan Rajagopal. 2014. "The Switching of a Rhenium(I) Complex from Turn-off to Turn-on Sensor System through Protein Binding." *RSC Advances* 4(65): pp. 34659–68.
25. Lo, Kenneth Kam Wing, Man Wai Louie, and Kenneth Yin Zhang. 2010. "Design of Luminescent Iridium(III) and Rhenium(I) Polypyridine Complexes as in Vitro and in Vivo Ion, Molecular and Biological Probes." *Coordination Chemistry Reviews* 254(21–22): pp. 2603–22.
26. Pu, Wan, Zhao Lun, Wang Lisha, and Xu Guangyang. 2013. "Linear Oxygen-Sensing Response from a Rhenium Complex Induced by Heavy Atom: Synthesis, Characterization, Photophysical Study and Sensing Performance." *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 112: pp. 228–36.
27. Wang, Chuan E. 2014. "An Oxygen-Sensing Rhenium(I) Complex with a Carbazole 'Shield' in Its Diamine Ligand: Synthesis, Characterization, Photophysical Property and Sensing Performance." *Journal of Luminescence* 145: pp. 531–38.
28. Xu, Xiao Yong, and Han Ning Xiao. 2012. "A Diamine Ligand with Long Arms and Its Corresponding Dinuclear Rhenium(I) Complex: Synthesis, Characterization, Photophysical Property, and Sensing Activity towards Molecular Oxygen." *Journal of Luminescence* 132(9): pp. 2251–58.
29. Wang, Xin Fang. 2013. "Study on a Rhenium(I) Complex with Oxadiazole-Derived Diamine Ligand: Synthesis, Characterization, Photophysical Property and Luminescence Response towards Molecular Oxygen." *Journal of Luminescence* 134: pp. 508–14.
30. Fu, Xiaoli et al. 2020. "High-Temperature Heat Flux Sensor Based on Tungsten-Rhenium Thin-Film Thermocouple." *IEEE Sensors Journal* 20(18): pp. 10444–52.
31. Bian et al. 2020. "Effect of Annealing on the Thermoelectricity Properties of the WRe26-In2O3 Thin Film Thermocouples." *Micromachines* 11(7): pp. 664-670
32. Huang, Genin Gary et al. 2011. "Gondola-Shaped Tetra-Rhenium Metallacycles Modified Evanescent Wave Infrared Chemical Sensors for Selective Determination of Volatile Organic Compounds." *Talanta* 85(1): pp. 63–69.
33. Huang, Genin Gary et al. 2018. "Cavity-Containing Rhenium Metallacycle Treated Evanescent Wave Infrared Chemical Sensors for the Selective Determination of Odorous Amines in the Atmosphere." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 254: pp. 424–30.
34. Liu, Kou et al. 2020. "A Sandwich-Type Photoelectrochemical Immunosensor Based on ReS2 Nanosheets for High-Performance Determination of Carcinoembryonic Antigen." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 320: pp. 128341. 35.

35. Veerakumar, Pitchaimani et al. 2018. “Activated Porous Carbon Supported Rhenium Composites as Electrode Materials for Electrocatalytic and Supercapacitor Applications.” *Electrochimica Acta* 271: pp. 433–47.
- 

**Information about authors:**

1. Moldagalieva Aida Asylbekovna – Master student, Al-Farabi Kazakh National University  
Email: Aidaa9898@mail.ru
2. Kudreeva Leila Kadirsovna – Candidate of Chemical Sciences, Deputy Dean for educational, methodological and educational work, Al-Farabi Kazakh National University  
Email: Leila.Kudreyeva@kaznu.kz  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-5670>
3. Kalyeva Akmeray Rakhimovna – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University  
Email: akmeray.kali@gmail.com
4. Auelbek Kazyna – Master student, Al-Farabi Kazakh National University  
Email: kauyebek@mail.ru

# ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 62-932.2  
МРНТИ 30.17.53

DOI 10.55452/1998-6688-2021-18-2-20-25

## CONDITIONS FOR THE OCCURRENCE OF ICING ON AERODYNAMIC PROFILES AND METHODS OF THEIR CALCULATION

AKHAZHANOV S.B., SKOROBOGATOV S.V.

*Buketov Karaganda university*

**Abstract.** *This article analyzes the methods and models suitable for studying the icing of the aerodynamic surface (wing). Systems to counteract the unifying effect are considered. Methods and models for calculating ice formations on aerodynamic surfaces are studied. Further study of the effect of icing will be conducted in the light of the characteristics of flow around bodies of viscous compressible medium in terms of load and liquid phase in case of changes in the geometric parameters of the bodies and reflect this change in the external stream.*

**Keywords:** *icing conditions, flows near the aerodynamic surface, moisture on the streamlined surface, formation of frost or ice, aerodynamic surfaces.*

## АЭРОДИНАМИКАЛЫҚ БЕЙІНДЕ МҰЗДАНУДЫҢ ПАЙДА БОЛУ ШАРТТАРЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ЕСЕПТЕУ ӘДІСТЕМЕСІ

АХАЖАНОВ С.Б., СКОРОБОГАТОВ С.В.

*Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті*

**Аңдатпа.** *Бұл мақалада аэродинамикалық беттің (Қанаттың) мұздануын зерттеуге сәйкес келетін әдістер мен модельдерге талдау жасалған. Бірлескен әсерге қарсы тұру жүйелері айқындалған. Аэродинамикалық беттерде мұздың пайда болуын есептеу әдістері зерттелді және модельдері қарастырылды. Мұзданудың әсерін зерттеу үшін одан әрі бағыт денелердің геометриялық параметрлері өзгерген жағдайда және осы өзгерісті сыртқы ағынға есепке алып, тасымалдаушы және сұйық фазаны ескере отырып, тұтқыр сығылатын орта арқылы денелердің ағу ерекшеліктері де ескеріле жүргізіледі.*

**Түйінді сөздер:** *мұздану шарттары, аэродинамикалық беттің жанындағы ағындар, сүйір бетіндегі ылғал, аяздың немесе мұздың пайда болуы, аэродинамикалық беттер, мұздану режимдері, НАСА профилі.*

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЙ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОФИЛЯХ И МЕТОДИКИ ИХ РАСЧЕТА

АХАЖАНОВ С.Б., СКОРОБОГАТОВ С.В.

*Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова*

**Аннотация.** *В данной статье произведен анализ методов и моделей, подходящих для исследования обледенения аэродинамической поверхности (крыла). Рассмотрены системы по противодействию обледенительному эффекту. Изучены методики и рассмотрены модели расчета образований льда на аэродинамических поверхностях. Дальнейшее направление для изучения эффекта обледенения будет*

*проведено при учете особенности обтекания тел вязкой сжимаемой средой с учетом несущей и жидкой фазы, в случае изменения геометрических параметров тел и учета этого изменения на внешний поток.*

**Ключевые слова:** условия обледенения, потоки около аэродинамической поверхности, влага на обтекаемой поверхности, образование изморози или льда аэродинамических поверхностей.

### **Introduction**

To find solutions to complex problems fluid and gas mechanics became possible thanks to a leap in the development

Computer and numerical methods, computational aerodynamics, which is why the possibilities of mathematical modeling have expanded. It became possible to simulate the process of fouling the aerodynamic surface with frost, frost and ice. Icing of the aerodynamic surfaces of machines and aggregates is a very dangerous effect, both for human safety and for the resource of mechanisms.

Icing occurs due to the presence of water droplets that are in a supercooled state, which get on the "cutting" edge of the continuous medium, freezes, gradually changing the shape of the streamlined surface, as a result of which the characteristics of the aerodynamic surface change.

The temperature of the continuous medium, the speed of movement of the masses of the continuous medium relative to the aerodynamic surface, pressure, diameter of supercooled droplets, water content – are parameters that affect icing.

Due to the presence of small particles of both dust and ice on the aerodynamic surface, the effect of crystallization of the supercooled liquid occurs.

At the present stage of development of science, there are already mathematical models of aerodynamic profile icing in which the technique is reduced to the following stages: determining the geometry of the wing, searching for a potential solution for the flow, calculating the boundary layer, determining the trajectories of drops, the equation of the thermal balance of mass conservation and changes in the geometric shape after icing.

Icing has a serious impact on flight safety, causing several dozen deaths a year. Icing also presents detrimental effects on mechanisms, increasing their wear and tear or rendering

them completely unusable. The danger of icing increases if there are reservoirs and mountains in the area.

Therefore, the study of this effect in adverse weather conditions is of interest. The process of steam condensation with subsequent ice formation is one of the main stages in the development of an anti-icing system. There are a number of undesirable effects, such as a decrease in the lifting force of the wing, an increase in the load on the elements, and a loss of efficiency. There is a complete change in aerodynamic properties, a decrease in the flow stall angle, an increase in the turbulent wake, and an increase in mass. The ice crust can collapse under the influence of vibrations or aerodynamic forces, causing damage to the machine unit.

### **The main meteorological parameters during the icing**

The formation of ice on aerodynamic surfaces occurs mainly when the surface is flowed by a medium that contains water droplets at negative ambient temperatures. The parameters that determine the rate of ice formation on surfaces are: water content, water droplet size and air temperature. Despite the fact that the water content can be very different in two relatively close regions of the continuous medium, it is customary to operate with the average values obtained at relatively large distances (several km). The water content decreases as the temperature decreases[1].

It should also be taken into account that the formation of ice occurs in places with sharp body geometry at a much higher rate than in flat places. All this is due to the fact that the air velocity in the vicinity of sharp and straight areas is lower, and the pressure is higher, which leads to an increase in temperature. The boundary layer in the vicinity of sharp parts is thinner.

### **Types of ice and its influence aerodynamic characteristics**

The formation of ice under icing conditions,

which solidifies firmly on surfaces, is classified as glassy, smooth, loose, mixed[2].

Vitreous-occurs in the event of rain, at temperatures near sub-zero, when drops freeze when they touch a cold surface. The gradual freezing of the drop is a consequence of the release of latent heat of the phase transition, so part of the drop has time to spread over the surface, resulting in layers of solid glassy ice with a high density. Such layered formations as a consequence change the shape of the aerodynamic profile.

Loose ice-is a consequence of the contact of drops with a surface with a temperature significantly below the temperature of zero degrees. The formation is formed from tiny ice particles, a weak structure with pores. Loose ice has a lower mass and density compared to glassy ice formation. It is formed in temperatures from -5 to -15 degrees Celsius.

The formation of a combination of vitreous and loose ice is called mixed ice. Glass is formed from large drops, while small ones form loose ice.

In the case of water vapor, it turns into ice before condensing, settling frost on the surface. The process occurs when the medium flowing around the airfoil changes its temperature upwards. Hoarfrost changes the thickness of the boundary layer causing earlier turbulent flows near the aerodynamic surface.

Based on the above information, we get the assumption that droplets are in the supercooled state temperature equivalent to the ambient continuum, striking the surface aerodynamic when considering the degree of supercooling of droplets and conditions flow profile influence their behavior after contact.

This model is based on when the solidification of droplets occurs in the proportions depending on the frozen fraction of the droplet, namely, the amount of latent heat of the phase transition released, which is absorbed by the environment. During icing, irregularities and roughness are formed, which affect the development of the boundary layer, changing the coefficient of heat exchange with the environment.

Different types of ice cause different types of icing wet, dry, liquid.

Wet-mode characterized by a temperature equivalent to the solidification temperature of water. Solidification occurs in the range of the coefficient from 0 to 1[3].

Water droplets in the supercooled state combine on the surface, turning into rivulets. The film is the case when the liquid is sufficient to cause the pooling of all the streams.

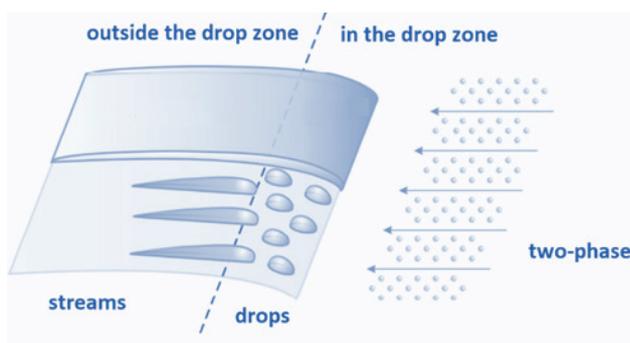


Figure 1 – Surface water condition of streamlined body

In wet icing, the frozen water fraction is zero. The liquid is found in the form of drops, films, or rivulets. Occurs when the surface has a temperature above zero degrees Celsius.

In the case of dry icing, the surface temperature is below zero degrees and the liquid freezes on the surface. The supercooled droplets hit the surface and form ice before spreading out.

#### Classification of de-icing systems

The choice of system depends on the type and method of application of the aerodynamic profile. Mathematical modeling of ice formation makes it possible to estimate the probability of icing in various conditions[4]. There are the following types that prevent the formation of ice on aerodynamic surfaces:

##### Thermal-air

They are widely used in machines with gas turbine engine units. Warm air is taken from the GTE compressor and directed to the places most susceptible to ice formation (blades, front part of the wing, fairings, etc.).

##### Electro-thermal

Vulnerable parts of the airfoil are equipped with special "thermal plates". The system requires high energy costs and is used on relatively small surfaces.

##### Liquid

It is based on alcohol, glycol. Used for both removal and prevention of ice formation. Limited by the amount of fluid reserve due to the design of the nozzles prone to clogging.

#### **Pneumatic**

In the case of an aerodynamic surface, it is a rubber "cushion" that deforms in the event of signs of icing. Ice formation occurs in small portions, then ice is dumped.

#### **Methods for calculating ice formation**

Mathematical models describing the formation of ice on aerodynamic surfaces were developed, allowing to assess the impact of formations on aerodynamic characteristics:

In 1951, two modes of icing were established: dry and wet, and the dependence of the intensity of formation on temperature, speed, and water content was demonstrated. The Ludlam border separates the dry and wet modes. Then the formation in the dry mode occurs under the condition of water content below the boundary and the temperature of the aerodynamic profile below the solidification temperature of the water. In wet mode, the profile temperature is equivalent to the water solidification temperature, and excess water is blown off the profile.

In 1952, it was found that a certain amount of water can be "locked" in the ice, thus forming spongy ice.[5]

In 1979, a thermodynamic model of icing on a stationary surface, on which supercooled water droplets fall, was determined. On the basis of the energy equation, a numerical model of ice formation was given, which can be used to judge changes in aerodynamic parameters. The model included the combination of two modes of dry and wet, thermal conductivity and convection of the boundary layer, water flow over the streamlined surface; thermal conductivity and convection inside the boundary layer; latent heat of evaporation, condensation of moisture and sublimation; thermal conductivity of ice and cylinder; aerodynamic heating caused by adiabatic compression of air in the boundary layer and kinetic energy of supercooled droplets falling on the cylinder. The result was compared with experimental data obtained by Stallabrass in 1957 and Macklin in 1961.

In 1980 to the present time, the development

and improvement of models has been continuous. Developed 2-dimensional models of ice formation on aerodynamic models in different modes: LEWIS 2D, Wright; ONERA, Gent; TRAJICE2D, Guffond; 2DFOIL-ICE, Dillingh.

Based on one of these models, models of ice formation in 3-dimensional form were developed: FENSAP-ICE 3D, MCGILL University, CANADA[6];

Recent improvements to numerical simulation software products include:

- calculation of the aerodynamic flow based on the shield method in two-dimensional formulation

- or on the Navier-Stokes equations in two- and three-dimensional formulations;

- analysis of the trajectories of supercooled droplets, allowing to determine the coefficient of capture of falling moisture on complex geometric shapes, which are usually based on the Lagrange method or on the Euler method;

- calculation of the boundary layer, taking into account the surface roughness caused by the presence of ice crust, when calculating the heat transfer coefficient;

- determination of the thermodynamics of solidification, which allows us to calculate the rate of ice build-up;

- a geometric module that describes the movement of the ice boundary, based on the trajectories of water droplets in dry mode or by the method based on the determination of the normal to the surface, in dry and wet modes [7],

- time sampling, to improve the description of the geometry and increase the accuracy of calculating

local heat and mass transfer coefficients.

The main differences between the programs, not including FENSAP-ICE, are in the calculation of aero-dynamic flow and evolution over time. Programs based on the shield method for calculating the potential flow can not determine the points of separation of the flow, so they give less accurate results compared to programs based on the Navier - Stokes equations, but they allow you to get a solution much faster[8].

Most models take into account only the flow of water in the form of a film, based on the

model developed by Al-Khalil and others. This assumption does not consider that water can be on the surface in various states determined by the action of aerodynamic, gravitational forces, as well as surface tension.

In the program LEWICE takes into account surface tension, which allows you to estimate the amount of water, which remains locked on the surface, based on the Weber number. Such parameters as surface roughness, ice density, residual amount of liquid water, as well as the processes of water droplets escaping outwards and water flowing down along the streamlined surface are currently insufficiently studied and they are taken into account using empirical relations[9].

In particular, Ruff, Shin and Bond were obtained relations for estimating surface roughness, Olsen and Walke for describing the processes of pulling out and spraying droplets, and Jones for determining the density of ice. These ratios were obtained for the icing conditions of the wings and other parts of the fuselage of the aircraft, but they are not very applicable to the blades of aircraft engines in accordance with the operating conditions (speed, altitude, angle of attack) and meteorological conditions (water content and average volume diameter of water droplets), which are very different[10]. Recent studies have also made it possible to better study the roughness of the ice surface and the physics of the liquid phase:

- the paper studies the measure and distribution of roughness on the ice surface, and shows that the empirical ratio is not adequate when the surface is covered with a film of water;

- studies allow us to analytically describe the formation and movement of film and rivulets on the surface;

- the paper shows that surface tension is the main factor affecting the formation of droplets on the wing surface;

- the behavior of the liquid phase on the wing surface is better studied.

These works allow us to use a thermodynamic model in which the liquid phase and roughness are defined using physical parameters, rather than empirical relations.

### Conclusion

Methods for studying the formation of icing of aerodynamic surfaces are analyzed, meteorological parameters, types of icing and effects on aerodynamic surfaces are described. Classifications of anti-icing systems are given. The next step in the study of the effect of icing is modeling considering the interactions of the carriers and liquid phases, forms of existence of the liquid on the aerodynamic profile at a certain mode of ice formation, determination of the impact of the change on the aerodynamic parameters, taking into account the effects of geometry changes in the motion of a continuous medium.

### REFERENCES

1. Aircraft Icing Handbook [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/659.pdf>. Date of treatment (11.12.2020).
2. I.H. Abbott, Von Doenhoff and A.E. Theory of Wing Section // Dover Publications, Inc. - 2014. - 302 p.
3. W.B. Wright. Users Manual for Improved NASA Lewis Ice Accretion Code LEWICE (NASA) // Contractor report. - 2017. - 95 p.
4. S.F. Ackley, M.K. Templeton. Computer Modeling of Atmospheric Ice Accretion // CRREL REPORT 2. - 2015.- P. 15-35.
5. G. Fortin. Prediction of ice shapes on NACA airfoil [Electronic resource]. - Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/228387958\\_Prediction\\_of\\_ice\\_shapes\\_on\\_NACA0012\\_2D\\_airfoil](https://www.researchgate.net/publication/228387958_Prediction_of_ice_shapes_on_NACA0012_2D_airfoil). Date of treatment (05.12.2020).
6. T.P. Meshcheryakov. Designing a protection system for aircraft and helicopters // Moscow: Mechanical Engineering. – 2001. - 222 p.
7. J.D. Anderson. Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications // McGraw-Hill Education. - 2017. - P. 32-77.

8. Ice Accretion Simulation, Agard, [Electronic resource]. - Access mode: <https://www ftp.rta.nato.int/public/Agard9.pdf>. Date of treatment (11/18/2020).
9. C. Bak, P. Fuglsang. Airfoil Characteristics for Wind Turbines // Ris-R-1065 (EN). - Risø National Laboratory. - Roskilde. - 2011. - P. 63-90.
10. L. Battisti. Class III - Basics on Icing For Wind Turbines // Lecture slides from course. - Wind Turbine Ice Prevention Systems Selection and Design. - Technical University of Denmark. - 2014
11. J.J. Chung, H.E. Add. A Numerical Evaluation of Icing effects on a Natural Laminar Flow Airfoil // NASA TM. - 2016. - P. 12-18.

---

**Information about authors:**

1. Akhazhanov Sungat Berkinovich – PhD, Associate Professor of the Department of Algebra, Mathematical Logic and Geometry named after prof. T.G. Mustafina, KarU named after E.A. Buketov  
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0903-3517>  
 Email: [stjg@mail.ru](mailto:stjg@mail.ru)
2. Skorobogatov Sergey Vladimirovich – 2nd year undergraduate student of the Department of Algebra, Mathematical Logic and Geometry named after prof. T.G. Mustafina, KarU named after E.A. Buketov  
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9454-904X>  
 Email: [skorobogalov@gmail.com](mailto:skorobogalov@gmail.com)

**ЖАСАНДЫ БҰЖЫРЛЫ ТЕЗАҒАРЛАРДЫҢ ЖАҢА КОНСТРУКЦИЯЛАРЫ****ДЖОЛДАСОВ С.Қ.<sup>1</sup>, ЯНГИЕВ А.А.<sup>2</sup>, РУСТЕМ Е.І.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>М.Х. Дулати атындағы Тараз Өңірлік университеті, 080000, Тараз, Қазақстан<sup>2</sup>Ташкент Ирригация және Ауыл Шаруашылығын Механикаландыру Инженерлері институты, 100012, Ташкент, Өзбекстан

**Аңдатпа.** Ғылыми жұмыста гидротехникалық құрылыстар мен құрылымдарға жататын жоғарғы бьеф пен төменгі бьефті жалғастыратын жасанды бұжырлы тезағарлардың жаңа конструкцияларын ойлап табу және оларды жетілдіру мәселелері келтірілген. Бұл гидротехникалық құрылымдардың басты мақсаты біздің Оңтүстік өңірлердегі таулы аймақтардағы биіктерден үлкен жылдамдықпен ағып түскен суды төменгі бьефтерде шайылу процесстерін болдырмау және ашық каналдарда қауіпсіз гидравликалық режимді жақсарту болып табылады. Осы ретте жоғарыдан ағатын судың артық кинетикалық энергиясын арнайы жасалған жасанды бұжырлы тезағарлардың көмегімен салыстырмалы қысқа жолда тиімді сөндіру қажет. Біздің ғылыми жұмысымызда экономикалық жағынан тиімді, берік және сенімді, конструкциясының қарапайымдылығы, құрылыс тұрғысынан ұтымды және оңай жүзеге асырылатын пішінде болуы және т.б. жағдайларын ескере отырып, пайдалы модельге алынған оң шешімі бар тезағар құрылымы оларға қойылған талаптарға жауап береді деп сенеміз.

**Түйінді сөздер:** гидротехникалық құрылымылар, жалғастырушы құрылымдар, тезағар конструкциялары, су өткізу құрылымдары, жасанды бұжырлық, су ағыны энергиясын бәсеңдеткіш, темірбетонды тезағар, ағын энергиясын бәсеңдеткіш тезағарлар

**НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ БЫСТРОТОКОВ С ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ****ДЖОЛДАСОВ С.К.<sup>1</sup>, ЯНГИЕВ А.А.<sup>2</sup>, РУСТЕМ Е.И.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Таразский Региональный Университет имени М.Н. Дулати, 080000, Тараз, Казахстан<sup>2</sup>Ташкентский институт Инженеров Ирригации и Механизации Сельского Хозяйства, 100012, Ташкент, Узбекистан

**Аннотация.** Научная работа посвящена разработке и совершенствованию новых конструкций быстотоков с искусственной шероховатостью, соединяющих верхние и нижние бьефы гидротехнических сооружений. Основное назначение этих гидротехнических сооружений - не допустить вымывания воды в нижнем бьефе, текущей с большой скоростью с высот в горных районах наших южных регионов и создать безопасный гидравлический режим в открытых каналах. В этом случае избыточную кинетическую энергию падающей сверху воды необходимо эффективно гасить за относительно короткий путь и время с помощью специально разработанных быстотоков с искусственной шероховатостью. В наших исследованиях основное внимание уделяется экономичности, прочности и надежности, простоте конструкции, рациональной и простой в реализации форме и т.д. Мы полагаем, что конструкция быстотока с положительным решением, полученным в полезной модели, с учетом обстоятельств соответствует предъявляемым к ним требованиям.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, соопрягающие сооружения, конструкции быстотоков, водопроводящие сооружения, искусственные шероховатости, гаситель энергии водного потока, железобетонный быстоток, быстоток гаситель энергии потока.

NEW FAST CURRENT DESIGNS WITH ARTIFICIAL ROUGHNESS

DZHOLDASOV S.K.<sup>1</sup>, YANGIEV A.A.<sup>2</sup>, RUSTEM E.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Taraz Regional university named after M.H. Dulati, 080000, Taraz, Kazakhstan

<sup>2</sup>Tashkent institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, 100012, Tashkent, Uzbekistan

**Abstract.** Scientific work is devoted to the development and improvement of new high-speed structures with artificial roughness, connecting the upper and lower beams of hydraulic structures. The main purpose of these hydraulic structures is not to allow water to flow downstream, flowing at high speeds in mountainous areas of our southern regions and to create a safe hydraulic regime in open canals. In this case, the excess kinetic energy of the falling water from the top of the water is necessary to soak for a relatively short distance and time with the help of specially developed fast currents with artificial flow. In our research, the main attention is paid to the economy, durability and reliability, simplicity of construction, rationality and simplicity in the implementation of the form, etc. We assume that the design of the fast current with a positive solution obtained in the utility model, with account of the circumstances, corresponds to the requirements to it.

**Key words:** hydraulic structures, conjugating structures, structures of rapid flows, water supply structures, artificial roughness, energy absorber of water flow, reinforced concrete rapid flow, rapid flow damper of energy flow.

**Кіріспе**

Соңғы жылдары Қазақстанның оңтүстік өңірлеріндегі таулы аймақтарында гидро-мелиоративтік жүйелеріндегі су тасымалы құрылымдары өте жиі істен шыға бастады. Ағысты реттейтін гидротехникалық құрылымдар (ГТК) бұдан 30-40 жыл бұрын салынғаны бізге белгілі. Бүгінгі күні еліміздегі көптеген гидротехникалық құрылымдар коммуналдық меншік (49%) және жеке меншік (31%) иелігінде. Олардың басым бөлігіне қайта жаңғырту жұмысы жасалмаған, бұл гидротехникалық құрылымдар жөнделмей өзінің ресурсын барынша пайдаланғандықтан, қауіптілігі жоғары нысандар болып табылады [1].

Соңғы 20-25 жылда бұл гидротехникалық құрылымдарға қайта жөндеу жұмыстары жасалмағандықтан, оның құрылымдарының қауіпсіздігі мәселесі қазіргі уақытта өте өзекті мәселе болып отыр. Тезағарлы каналдардың төменгі бьефтерінде шайылу процесстерінің алдын алу үшін ғалымдар жасанды бұжырлы тезағарлардың жаңа конструкцияларын ойлап табуда. Соңғы жылдары М.Х. Дулати атындағы Тараз өңірлік университетінің ғалымдары, докторанттары мен магистранттары осы бағытта жемісті еңбек етіп

келеді. Олар жалғастыру құрылымдарының жаңа конструкцияларына бірнеше патенттерге оң шешім алды. Төменде соңғы 1-2 жылда алынған пайдалы модельге өнертабыстар келтірілген. Енді осы өнертабыс алынған патенттерге «Су ресурстары» кафедрасына қарасты «Гидротехникалық құрылымдардың гидрогеологиялық және техникалық қауіпсіздігі» ғылыми-зерттеу лабораториясында алынған өнертабыс негізінде әртүрлі жасанды бұжырлы тезағарлардың модельдерін жасап ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізіп жатыр.

Университет ғалымдары ойлап тапқан пайдалы модель гидротехникалық құрылымдарға жатады, соның ішінде бьефтерді жалғастыру құрылымдары болып табылады. Олар каналдардағы сулардың жоғарғы бьефтен төменгі бьефке өту кезінде, бір деңгейден екінші бір деңгейге қауіпсіз ең қысқа жолмен түсіруге арналған құрылымдарға жатады және аталған құрылымдарды тезағарлы каналдардың барлығында байланыстырушы ретінде пайдалануға болады [2]. Бізге белгілі жоғары қысымды терең суағар, оның арынды бөлігінің соңында тарылумен жабдықталған құбыр түрінде жасалған және ол пирамидалы пішінді етіп орындалған. Құбыр диаметрі бойынша биіктігі оның ширегінен артық емес жә-

не су кескіш қабырғаның көлбеу бұрышы құбыр осіндегі бойлық қабырғаға 15 градустан артық емес етіп орнатылған [3].

Бұл құрылғының ағын энергиясын төмендетудің тиімділігі төмен, себебі ағыстардың өзара айналуын қамтамасыз ете алмайды және олардың соқтығысу әсері төмен деңгейде. Сонымен қатар транзиттік учаскесінің соңында тағы да толқындар ағынның үлкен жылдамдығы салдарынан арнаның еңістерін қорғаудың қымбат тұратын құралдарын қолдануын қажет етеді. Бұл өнертабыстың ең негізгі кемшіліктеріне конструкциясының күрделілігі және оның құралдарының қымбаттығы, оның экономикалық жағынан тиімсіз екендігін аңғартады, оның құралдары істен шыққан жағдайында, оларды ауыстыруға көп уақыт және көп қаражат жұмсалады. Техникалық негізі мен қол жететін әсеріне қарай өнертабысқа жақындау болып, ағын энергиясын бәсеңдеткіш жатады. Ағын энергиясын бәсеңдеткіш – оның төменгі және бүйір қабырғалары суұрма құдықтан құралған, ол суұрма құдық жұптасқан кіріс су құбыры және ағызу каналынан тұрады, ал ені суұрма құдық енінен аз болып келеді. Ол жерде горизонтальді қалқымалы құрылғы, су өткізгіш құрылғылары арынды етіп орнатылған және оның төменгі бөлігінде саңылаулары қысымды құбырдың ішіне көлбеу жабдықталған. Ол жерде бәсеңдеткіш бойлық серпімді панель түрінде жасалады, оның бір бөлігі қатаң бекітілген, ал төменгі бөлігі қосымша салмақ құру үшін құбырлы серпімді қуыста жасалған. Сонымен қатар, құбырлы серпімді қуыс бөліктің соңынан төмен емес деңгейде орналасады, ал құбырдың жоғарғы шеті ілмек арқылы қыстырғышқа қосылады және реттелетін қарсы салмақпен төменгі ағын бағытына орнатылады. Бәсеңдеткіш серпімді болу үшін, оның төменгі деңгейден азайып кетпеуіне жол бермеу үшін құбырлы серпімді қуысты пенопласпен толтырылады.

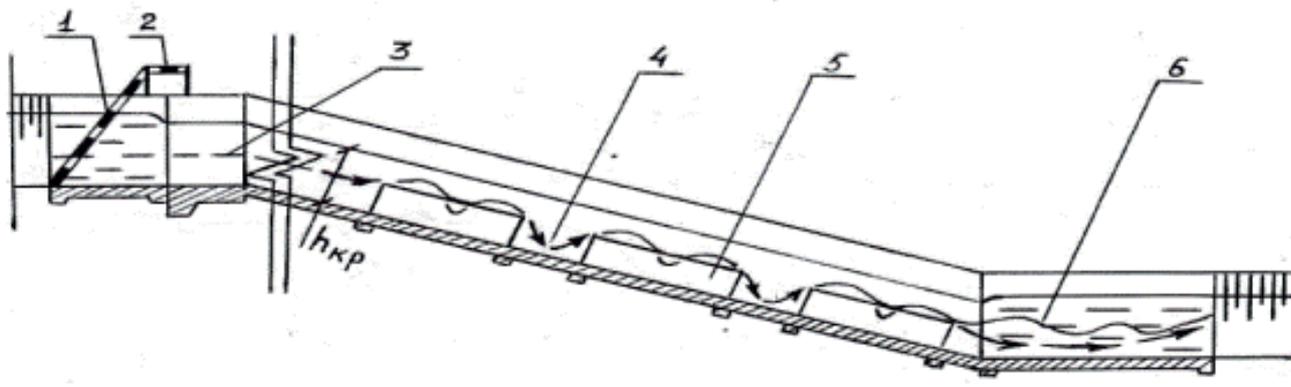
Арын бәсеңдеткіштің кемшілігіне – құрылғы конструкциялары санының көптілігі, күрделілігі және бөлшектерінің тапшылығында, яғни оларды тезағар конструкцияларына орнату үшін қажетті құрылғы бөлшектерін

дайындайтын зауыттарға жеке тапсырыс беру және оларды жасату да тиімсіз болып табылады деп ойлаймыз, себебі ол конструкцияны көпшілік су мекемелері пайдаланбайды. Сондықтан бұл арын бәсеңдеткіш экономикалық жағынан тиімсіз, конструкциясының ұзындығын қысқартқанымен, оның бөлшектерінің беріктігі жоғарыламайды, арнадағы су мөлшері мен ағын жылдамдығына тәуелділігі де өзгермейді. Тезағардағы ағын энергиясын бәсеңдеткіштің сенімсіз конструкциялары (құрылғылары), арнадағы судың жылдамдығы мен өтімі өзгеруіне байланысты үнемі тербелісті қозғалыста болады. Бұл өз кезегінде конструкцияның сенімсіз жерлерінің тез бүлінуіне алып келуі мүмкін. Көптеген құрылғыларының бірі ғана істен шықса, арнадағы қозғалыс режимі өзгереді, бұл арын бәсеңдеткіш құрылғының дұрыс жұмыс істеуіне кедергі жасай отырып, каналдың төменгі бьефінде шайылу процесі пайда болуы мүмкін. Сондықтан, бір бөлшектің бүлінуінен бүкіл арын бәсеңдеткіш тезағар құрылғысының жұмыс істеуі тиімділігі төмендейді және оның қызмет ету мерзімі қысқарады [4].

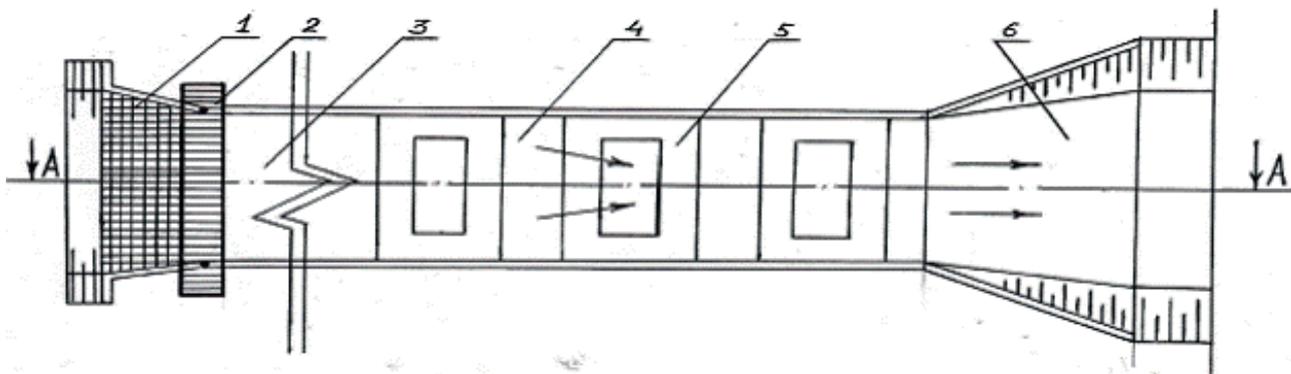
Біз осы кемшіліктерді ескере отырып, ойлап ұсынылатын өнертабысымыздың техникалық жетістіктері болып мына көрсеткіштерді айтуымызға болады: ол судың кинетикалық энергиясын бәсеңдетуге сенімді әсер етеді, конструкциясының қарапайымдылығы; темір-бетонды конструкциялар өз елімізде өндіріледі, оларды тезағарға орнату оңай болып табылады, қажет болған жағдайда оңай ауыстырылады, материал шығынының аздығы; экономикалық жағынан тиімділігі; оның жұмыс істеуі сенімділігі мен оң әсер беруі және де осы құрылымның ұзақ уақыт жұмыс істеу мерзімі болып табылады. Өнертабыстың техникалық ерекше жетістікке қол жеткізілуі туралы айтатын болсақ, құрылымның кіру бөлігі алдында тасынды-қоқыс тұту торы орналасқан, ағынның арын энергиясын бәсеңдетуге арналған құрылғы-науа ұзындығының төменгі жағынан 1/3 бөлігіндей аралықта орналасады. Оның биіктігі алмағайып тереңдікке тең, темір-бетонды конструкцияның ішкі жағы (ортасы) ашық, үш қатардан

тұрады және еңісті науа түбіне бекітіледі. Темір-бетонды конструкцияның сыртына М-50 маркалы битумды-майлы мастика жағамыз, осылайша бұл темір-бетонды конструкцияның коррозия процесіне төзімдігін арттырады. Тезағардың кіру бөлігі алдында тасынды-қоқыс тұту торы сумен ағып келген ірі тасынды-қоқыстарды ұстап қалады, ол да өз кезегінде науадағы бойлық темір-бетонды конструкциялық құрылғының қырларын тез жарамсыз болуын (кавитация) тоқтатады. Битумды-майлы мастика материалының басты артықшылығы: ол төменгі ( $-50^{\circ}\text{C}$  дейін) және жоғары ( $+100^{\circ}\text{C}$ ) температураларға төтеп бере алады. Битум мастикасы зақымдалмай және сапасын жоғалтпай жоғары ылғалдылық, жоғары немесе төмен температура жағдайларына төтеп беретіндігі үшін қазіргі кезде гидротехникалық құрылыста кеңінен қолданылып жүр. Біз сол себепті осы гидроқшаулағыш материалды өз өнертабысымызда пайдалануды жөн көрдік. Су жеткізу каналының кіру бөлігі арқылы келетін еңісті

транзитті науадан, шығу бөлігінен, шығу бөлігіндегі табандық қабырғаға орнатылған темір-бетонды ағын энергиясын бәсеңдеткіш, яғни темір-бетон сыртына М-50 маркалы битумды-майлы мастика жағылған конструкциядан тұрады. Ал осы темір-бетонды ағын энергиясын бәсеңдеткіш транзитті бөліктегі еңісті науа ұзындығының төмен жағынан  $1/3$  бөлігіндей арақашықтықта үш қатар етіп орналастырылады. Бұл ағын энергиясын бәсеңдеткіш темір-бетон конструкциялық тезағардың басқаларынан ерекшелігі: науа ұзындығының төменгі жағында табандық қабырғаға бекітілген алмағайып тереңдікке тең бойлық орнатылған су ағысына қарсы бағытта орналасуында. Бұл жерде жоғарыдан қатты жылдамдықпен еңісті транзитті науадан келіп түскен су ағыны бірінші тұрған темір-бетонды конструкцияға соқтығысады, одан соң темір-бетон конструкциядан асып түсіп ашық науа түбіне құйылады да, ағын қайта жоғары көтеріліп қабырғадан асқан соң, екінші темір-бетонды конструкция арасында су тағы



1 сурет – Су ағыны энергиясын бәсеңдеткіштің бойлық қимасы



2 сурет – Су ағыны энергиясын бәсеңдеткіштің жоспардағы көрінісі

науа түбіне түседі де, қайтадан жоғары көтеріледі. Осылайша келесі тұрған темір-бетонды конструкцияларда процесс қайталанып отырады, осы процестердің арқасында толқындар пайда болып ағын арыны бәсеңдей бастайды. Келесі темір-бетонды арын бәсеңдеткішке соқтығысып, майда ағыстарға таралады, яғни бөлінген майда ағыстар жанжақтағы қабырғаларға тағы ұрылады, осылайша су ағынының кинетикалық энергиясы төмендейді, науада ұзына бойы толқындар пайда болады және ағыстардың жылдамдықтары кеми бастайды.

1-суретте темір-бетон конструкциялық тезағардың бойлық қимасы, ал 2-суретте темір-бетон конструкциялық тезағардың жоспардағы үстінен қарағандағы көрінісі көрсетілген. Темір-бетон конструкциялық тезағар, тасынды қоқыстарды тұтатын тордан 1, торда жиналған жүзбе заттарды алып тастауға арналған көпірден 2, кіру бөлігінен 3, транзитті бөлікті еңісті науадан 4, тезағар ұзындығының төмен жағынан 1/3 бөлігіндей арақашықтықта орнатылған темір-бетон конструкциядан 5 және науа енінен канал түбі еніне дейін кеңейген шығу бөлігі телімдерінен 6 тұрады. Бізге қажетті алмағайып биіктікте орнатылған темір-бетон конструкциялық ағын энергиясын бәсеңдеткіш сыртына битумды-майлы мастика жағылған, со-

нымен қатар олар үш қатар етіп орнатылған, осы жағдайлар біздің оң шешім алып отырған пайдалы моделіміздің жаңашылдығы болып табылады.

Біздің ойлап тапқан темір-бетон конструкциялық жасанды бұжырлы тезағарымыз былай жұмыс істейді: су – каналмен тезағардың кіру бөлігі 3 арқылы еңісті науаның 4 бойымен ағын энергиясын бәсеңдеткіштен 5 өтіп, яғни бізге қажетті үш қатар орналасқан темір-бетонды арын бәсеңдеткішке жоғарыдан аққан су қатты жылдамдықпен соқтығысады да, одан соң темір-бетон конструкциядан асып түсіп ашық науа түбіне құйылып, ағын қайтадан жоғары көтеріліп қабырғадан асқан соң, екінші темір-бетонды конструкция арасында су тағы да науа түбіне түседі де, қайтадан жоғары көтеріледі. Осылайша келесі тұрған темір-бетонды конструкцияларда процесс қайталанып отырады. Темір-бетон конструкциялық арын бәсеңдеткішке қайта-қайта соқтығысу арқасында судың жылдамдығы бәсеңдейді. Осы жағдайлардың бәрі су арынын бәсеңдетуге әсер етіп, гидротехникалық құрылымның жұмыс істеу мерзімін ұзартады және оның тиімділігін жоғарылатады.

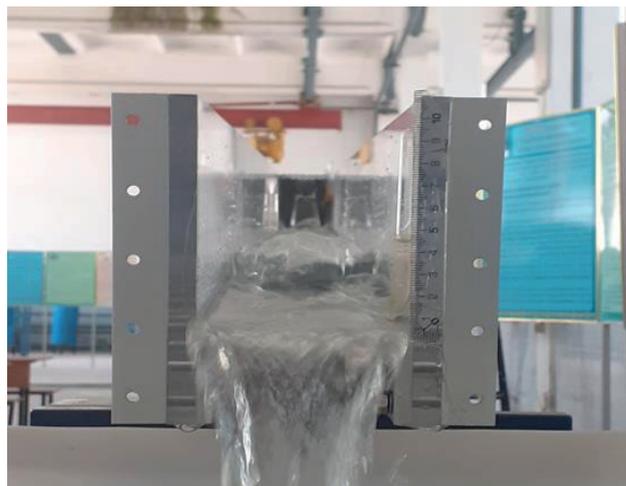
Осылайша су – науа енінен канал түбі еніне дейін кеңейген шығу бөлігі телімінен 6 алып кетуші каналға түседі. Су энергиясын төмендету, биіктігі судың алмағайып те-



3 сурет – S8-MKLL қондырғысындағы су ағыны энергиясын бәсеңдеткіштің бойлық қималық көрінісі

реңдігіне тең темір-бетонды арын бәсеңдеткіш, ағыс бағытына қарсы қойылуымен іске асырылады. Кіру бөлігі алдында тасынды-қоқыстар тұту торы 1 бойлық құбырдың жақсы жұмыс істеуі үшін ірі қоқыс-тасындыларды тұтып отырады, тұтылған жүзбе қоқыстар көпір 2 көмегімен алынып сыртқа шығарылып отырылады, науа 4 ұзындығының төмен жағынан шамамен 1/3 бөлігінде аралығында арын энергиясын төмендетуге арналған биіктігі алмағайып тереңдікке тең, бізге қажетті өлшемді темір-бетонды арын бәсеңдеткішке 5, жоғарыдан ағып келген қатты жылдамдықты су ағынының соқтығысуы арқасында оның кинетикалық энергиясы бәсеңдейді. Себебі сол жерде қабырғаға орналасқан битумды-майлы мастика жағылған темір-бетонды арын бәсеңдеткішке соқтығысқан су ағыны майда ағыстарға таралады, бөлінген майда ағыстар жан-жақтағы қабырғаларға тағы ұрылады, толқындар пайда болады, осыған орай ағын жылдамдығының кинетикалық энергиясы төмендейді. Осы процесстердің барлығы тезағар науасының гидравликалық режимін жақсартады, сондықтан бұл тезағарға суұрма құдықты салу қажеттілігі туындамайды және қосымша шығындар азаяды. Біздің ойлап тапқан өнертабысымыздың басқа өнертабыстардан ерекшелігі мынадай: «су ағыны энергиясын бәсеңдеткіш тезағар, бәсеңдеткіш құрылғыдан және камерадан: кіру бөлігінен, транзиттік бөлігіндегі еңісті науадан және шығу бөлігінен тұратын, келесімен ерекшеленеді транзиттік бөліктен шығу аймағы басталатын жерде, биіктігі алмағайып (критикалық) тереңдікке тең, қабырғаға үш қатар етіп вертикаль бекітілген, битумды-майлы мастика жағылған темір-бетонды бәсеңдеткіштің, су ағысына бойлық бағытта орналасуында» [5].

Біздің өнертабысқа пайдалы модельге оң шешім алу негізінде М.Х. Дулати атындағы Тараз өңірлік университетінің «Су ресурстары» кафедрасының «Гидротехникалық құрылымдардың гидрологиялық және техникалық қауіпсіздігі» ғылыми-зерттеу лабораториясында S12–MKLL стендіне жоғарыда айтылған [5] өнертабысқа модель жасалып, су-



4 сурет – S8–MKLL қондырғысындағы су ағыны энергиясын төмендету процесінің көрінісі

дың кинетикалық энергиясын төмендету жұмыстарын бейне түсіру және фото суреттерге түсіру арқылы жүргіздік. Жасанды бұжырлы тезағарда жылдамдығы жоғары ағындар кезінде бұжырлығы биіктеу жерлерде толқындық айналулар және аэрация кезінде пайда болатын гидродинамикалық процесстердің сапалы көріністерін қарастырдық. Сонымен қатар, біз нақты гидравликалық жағдайларды ескере отырып, лабораториялық зерттеулерде барлық спектрлерінде қолайлы гидравликалық режимге ие құрылымның максималды экономикалық тиімділігі мен сенімділігін қамтамасыз ететін жасанды бұжырлы тезағардың тиімді түрін таңдадық деп ойлаймыз [6].

#### Қорытынды

Жасанды бұжырлықты тезағарлар жұмысына нақты деректер алу үшін, сіздер бұрын алынған патенттелген [7-10] еңбектерді де ескергендеріңіз жөн деп ойлаймыз. Сонымен мына төмендегі суретте (4-сурет) университет ғалымдары мен докторанттарының S12–MKLL қондырғысында темір-бетонды конструкциялық жасанды бұжырлы тезағармен эксперименттік жұмыстарын жасап жатқан көріністері көрсетілген. Осы пайдалы модельге алынған оң шешім бойынша қазіргі кезде лабораториялық ғылыми-зерттеу жұмыстары жүргізілуде, нақты алынған нәтижелерімізді қорытындылап келесі еңбектерімізде көпшілікке жариялайтын боламыз.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. <https://strategy2050.kz/news/13388/>.
2. Гидротехнические сооружения под ред. Н.П.Розанова – М., изд-во «Агропромиздат», 1985. – С.259-262.
3. Авторское свидетельство №905362, кл. E02B 8/06, 1982
4. RU2647895C1.,2018.03.21г., «Гаситель энергии водного потока», Голубенко Михаил Иванович (RU)
5. Е.І.Рүстем, Е.С.Ахметов, С.Ж.Тәттібаев, Г.А.Сарбасова, М.Т. Омарбекова, А.Н. Нурлыбаева. Гаситель энергии водного потока. Патент на полезную модель №5257, (21) 2020/0453.2.
6. О.М. Айвазян. О применении усиленной шероховатости для предотвращения волнообразования на быстротоках /«Гидротехника и мелиорация». – 1968. – № 10. – С.79-84.
7. Е.І. Рүстем, Е.С. Ахметов, Б.Ш. Смаилов, Г.Д. Койшибаева, М.Т. Байжигитова, А. Н. Нурлыбаева. Габрионный быстроток. Патент на полезную модель № 4995, 28.02.20ж.
8. С.М. Койбаков, Т.Т. Утегалиев, С. Джалдасов. KZ (A) 12215. 15.11.2002, бюл.11.
9. С.К. Джалдасов, С.М. Қойбақов, К.Қ. Шилібек. Құбырлы тезағар // Инновациялық патент №27759, 26.04.12.
10. С.К. Джалдасов және т.б. Арын бәсеңдеткіш тезағар // Инновациялық патент №27760, 26.04.12.

## REFERENCES

1. <https://strategy2050.kz/news/13388/>.
2. Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya pod red. N.P. Rozanova – M .. izd-vo "Agropromizdat". 1985. - S.259-262.
3. Avtorskoye svidetelstvo No. 905362. kl. E02V 8/06. 1982
4. RU2647895C1..2018.03.21g .. "Gasitel energii vodnogo potoka".. Golubenko Mikhail Ivanovich (RU)
5. E.I. Rustem, E.S. Akhmetov, S.Zh. Tibayev, G.A. Sarbasova, M.T. Omarbekova, A.N. Nurlybayeva. Gasitel energii vodnogo potoka. Patent na poleznuyu model No. 5257. (21) 2020 / 0453.2.
6. O.M Ayvazyan. O primenenii usilennoy sherokhovatosti dlya predotvrashchenii volnoobrazovaniya na bystrotokakh / "Gidrotekhnika i melioratsiya". - 1968. - No. 10. - S.79-84.
7. E.I .Rustem, E.S Akhmetov, B.Sh. Smailov, G.D. Koyshibayeva, M.T. Bayzhigitova, A. N. Nurlybayeva. Gabionnyy bystrotok. Patent na poleznuyu model No. 4995.28.02.20zh.
8. S.M. Koybakov, T.T. Utegaliyev, S. Dzhholdasov. KZ (A) 12215.15.11.2002. byul.11.
9. S.K. Dzhholdasov, S.M. Koybakov, K.K. Shilibek. Qubyrly tezagar // Innovatsiyalyq patent 10. No. 27759. 04/26/12.
11. S.K. Dzhholdasov zhane t.b. Aryn basendekish tezagar // Innovatsiyalyq patent No. 27760. 04/26/12.

### Information about authors:

1. Dzhholdasov S.Y. – PhD, Associate Professor, Taraz Regional University named after M.H. Dulati
2. Yangiev A.A. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Uzbekistan
3. Rustem E.I. – PhD student, Taraz Regional University named after M.H. Dulati

**COMPLEX EVENT PROCESSING APPROACH ON SUBSCRIBERS'  
DATA OF TELECOM OPERATOR****ZHUMEKENOV A.***Kazakh-British technical university, 050000, Almaty, Kazakhstan*

**Abstract.** Nowadays, the usage of mobile phones reached extremely large worldwide proportions and increasing dramatically, there is a stronger need to decrypt the important information that is hidden among them. Even all needed information is gained, the processes of companies remain static and can't be changed dynamically to adapt to actual business needs, reducing the advantages that can be achieved. Every second, millions of raw information are generating by mobile users, which are handled by Telecom operators in data servers. By using the Complex Event Processing (CEP) approach in real-time, we can obtain the information that matters to our business and use it to monetize the vast amount of data that is being collected through mobile phone usage. In this paper, we present an internally developed framework that combines the strengths of CEP and business process implementations, which allows us to react to the needs of today's fast-changing environment and requirements. We demonstrate 3 simple use case scenarios to show the effectiveness of the CEP approach in our situation. The importance of implementing the CEP approach on subscribers' data should not be overlooked as means of trying to capitalize on new services but have to be considered as a challenge to allow subscribers get more customized offers and services.

**Keywords:** Complex Event Processing, Telecom Data Analysis, Information Processing, Targeted campaigns.

**БАЙЛАНЫС ОПЕРАТОРЫНЫҢ АБОНЕНТТІК ДЕРЕКТЕРДІ  
ӨНДЕУДІҢ КЕШЕНДІ ТӘСІЛІ****ЖУМЕКЕНОВА.***Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан*

**Аңдатпа.** Қазіргі уақытта ұялы телефондарды пайдалану бүкіл әлем бойынша өте үлкен мөлшерге жетті және күрт өсуде, олардың арасында жасырылған маңызды ақпаратты шифрдан шығару қажеттілігі күшейе түседі. Тіпті барлық қажетті ақпарат алынады, компаниялардың процестері тұрақты болып қалады және оларды қолдауға болатын артықшылықтарды азайта отырып, іскери қажеттіліктерге бейімдеу үшін динамикалық түрде өзгерту мүмкін емес. Әр секунд сайын ұялы байланыс пайдаланушылары миллиондаған шикі ақпараттар шығарады, оларды байланыс операторлары деректер серверлерінде басқарады. Нақты уақыт режимінде іс-шараларды өңдеудің кешенді әдісін қолдану арқылы біз өз бизнесіміз үшін маңызды ақпаратты ала аламыз және оны ұялы телефондарды пайдалану арқылы жиналатын көптеген деректерді монетизациялау үшін қолдана аламыз. Бұл жұмыста CEP пен бизнес-процестерді жүзеге асырудың мықты жақтарын біріктіретін ішкі дамыған құрылымды ұсынамыз, яғни қазіргі заманғы тез өзгеріп отыратын ортаның қажеттіліктері мен талаптарына жауап беруге мүмкіндік береді. Аталған CEP тәсілінің тиімділігін арттыру үшін 3 қарапайым сценарийді көрсетеміз. Абоненттердің мәліметтеріне CEP тәсілін енгізудің маңыздылығы жаңа қызметтерді пайдалануға тырысу құралы ретінде ескерілмейді, ал олай болса, абоненттерге неғұрлым бейімделген ұсыныстар мен қызметтерді алуға мүмкіндік беру мәселесі ретінде қарастырылуы керек.

**Түйінді сөздер:** абонент деректер анализі, мақсатты науқандар, байланыс оператордың анализі, мақсатты қауқандар

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ СОБЫТИЙ АБОНЕНТСКИХ ДАННЫХ ОПЕРАТОРА СВЯЗИ

**ЖУМЕКЕНОВ А.**

*Казахстанско-Британский технический университет, 050000, Алматы, Казахстан*

**Аннотация.** В настоящее время использование мобильных телефонов достигло чрезвычайно больших масштабов во всем мире и продолжает стремительный рост, в связи с чем существует большая потребность в расшифровке важных данных, которые скрыты от обычных пользователей. Даже если все необходимые данные по абонентам получены, процессы компаний остаются статичными и не могут динамически изменяться для адаптации к реальным потребностям бизнеса, что снижает достижимые преимущества. Каждую секунду мобильные пользователи генерируют миллионы необработанных и неструктурированных данных (например, информация о звонках, СМС, пользование интернетом), которые хранятся операторами связи на серверах данных. Используя подход комплексной обработки событий (КОС) в режиме реального времени, мы можем получить информацию по абонентам, которая действительно важна для бизнеса телекомоператора, и использовать ее для монетизации. В этом документе мы представляем решение, которое объединяет сильные стороны КОС и методологию автоматизации бизнес-процессов, что позволяет реагировать на потребности сегодняшней быстро меняющейся среды и требований со стороны бизнес-заказчиков. Мы продемонстрируем 3 сценария использования, чтобы показать эффективность подхода КОС. Не следует рассматривать реализацию подхода КОС к данным абонентов как попытку извлечь бизнес-выгоду с помощью монетизации услуг, а следует рассмотреть как возможность, позволяющую абонентам получать таргетированные предложения и сервисы.

**Ключевые слова:** комплексная обработка событий, анализ телекоммуникационных данных, обработка информации, целевые кампании

### Introduction

In 2019, the mobile phone user database reached almost 70% of the global population, with more than 5 billion devices in use [1]. Given the dynamicity of today's business environments, there is a need to continuously adapt and keep up-to-date the business processes in order to respond to the changes in those environments and keep a competitive level among Telecom operators and solution providers. One of the main concerns for Telecom operators' applications is to handle and interpret online raw data. By using the CEP approach and developed framework we can facilitate the solution of this problem by gathering needed information in real-time about the subscribers' different events on the Telecom network in order to determine the necessity of making specific offers and suggesting new promo.

Real-time data processing systems are used widely to provide insights about events as they happen. Many companies have developed their systems: Twitter's Storm [10] and Heron [9], Google's Millwheel [8], LinkedIn's Samza [7] and Facebook's Puma, Swift and Stylus [11].

One of the main challenges for processing data dynamically is the size and the speed of incoming data at which it is being generated. Every second, millions of data are generated by phone mobile users and entire traffic allocates to Telecom operator's data centers. Despite having a common goal, solutions based on CEP differ in a wide range of aspects, including architectures, data models, rule languages, and processing mechanisms. In part, this is due to the fact that they were the result of the research efforts of different communities, business market demands, each one bringing its view of the problem and its background for the definition of a solution [3].

In this paper, an internally developed framework is presented that combines the advantages of the CEP and dynamic business process adaptation, which allows us to respond to the needs of today's rapidly changing environments. Subscriber information for different business-specific use cases and triggers is handled such as balance information, mobile internet usages, the location of the device to enrich data about subscribers, and give deep

insights on user’s interest, lifestyle patterns in a given time period. The picture below illustrates our main idea of implementing the CEP approach on Telecom operator’s data traffic.

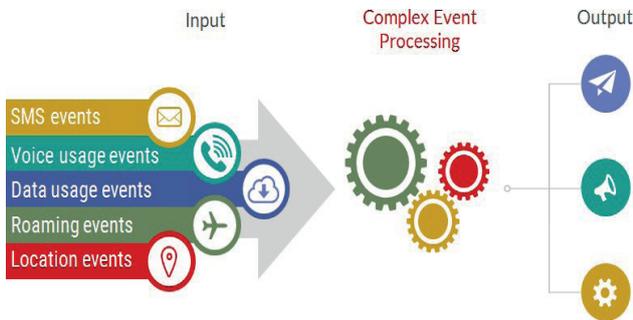


Fig. 1. Main idea

**The Framework**

Before we start our journey on solution architecture, it is important to say about motivations, limitations and business/technical requirements that faced.

Firstly, we need to mention the current limitations of legacy systems, where transactions per second (TPS), in our case Events Per Second is more precise, was limited by 2000. Taking into account, that a subscriber base reaches 10 million and an active subscriber base is almost 6 million, that threshold is insufficient to cover and handle all network events in real-time. Besides, the system was consuming all resources all the time, which caused performance issues and several critical incidents on the system. Analyzing the data traffic throughout (22.5 TB/month), dynamicity of business requirements, and capabilities of the new solution, challenged us to handle at least 165 000 events per second.

Secondly, from the technical perspective, our approach was to create one job that will run all triggers and business rules. By this approach, we should benefit that all triggers and business rules will run effectively, and manage rules without restarting the system.

Our proposed solution uses a component-based architecture, where each component plays a critical role in a whole system. Figure 2 on page 3 illustrates a high-level overview of the system. On the left, the ingestion layer is responsible for fetching and receiving raw data from different

data sources (SMS events, Voice usage, Internet usage, Location-based triggers) and saving it into the Events hub. Then the data is consumed by the event execution engine, which in turn, based on current trigger definitions, outputs notifications to the Events hub. Finally, the outgestion layer fetches the notification and dispatches them to appropriate subsystems. All main components in the architecture will be described in the next sections to give you a more detailed overview of the solution.

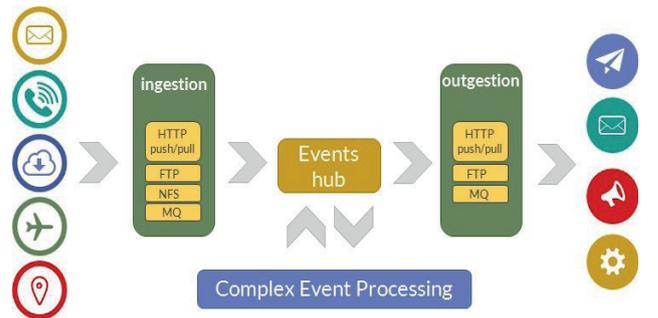


Fig. 2. High-level architecture overview

**The Ingestion**

The process of collecting data from various data sources, preparing it, and saving it for complex processing and generating triggers. Currently, there are several different approaches to how a data ingestion pipeline can be built:

- The first approach consists of two steps. Firstly, the raw data is fetched from a data source and is a subject for some preliminary processing, e.g., splitting a huge file containing multiple events. After that, the data is being transformed, serialized, and finally pushed to the Events hub, where it waits for consumption by the event execution engine. This approach is preferred whenever the event transformation is complex or the data volume is too big to be processed in the ingestion layer.
- The data is fetched/received, transformed, and serialized within the same pipeline.
- The raw data is immediately pushed to the Events hub. Transformation takes place in the execution engine.

It is worth mentioning that both intermediate results and transformed events are stored in Events hub topics. Each event type (more

precisely, events originating from the same data source) is kept in a separate topic. Despite which ingestion approach suits better, we need to notice what file types and protocols can be ingested in our system. To illustrate how various file types are fetching and transforming to one input format, see figure 3 on page 3

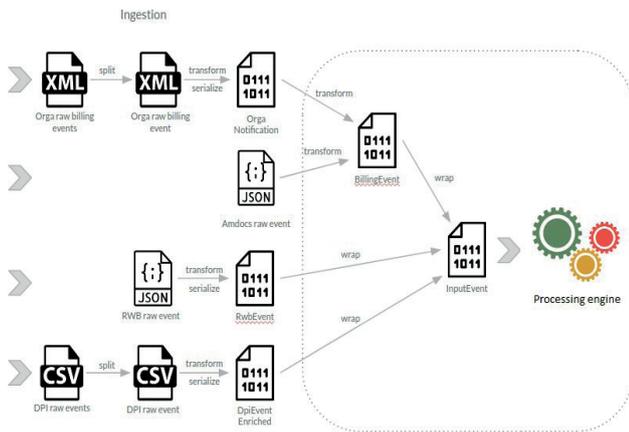


Fig. 3. Ingestion file types

**Events Hub**

It is a system that keeps all the in-flight data streams in a reliable and persistent way. The data in an Events hub topic is divided into partitions. The partitions are distributed over the servers in the cluster with each server handling data and requests for a share of the partitions. Each partition is replicated across a configurable number of servers for fault tolerance. For a topic with replication factor N, the Events hub tolerates up to N-1 server failures without losing any records committed to the topic.

**The processing engine**

It is an execution engine for complex event processing applications. In this component, streaming applications are implemented, that consume all the prepared events by the ingestion system and apply trigger procedures defined by business users. The provided management functionalities over the CEP applications, like define, start/stop of the application. Execution jobs are stateful. To make state fault-tolerant, the processing engine makes periodic checkpoints of the state. Checkpoints allow to recover state and positions in the streams in case of a program failure (due to machine, network, or software

failure). Any records that are processed as part of the restarted job are guaranteed to not have been part of the previously checkpointed state. In other words, each event from an input stream affects the data flow state exactly once. However, it does not mean each event is processed only once. More precisely, when the state and input streams' offsets are restored, the processing engine needs to replay the events that have been processed between the last checkpoint and the failure. In consequence, for instance, some notifications might be generated twice. To illustrate how state and checkpoints are working, please see figure 4 below.

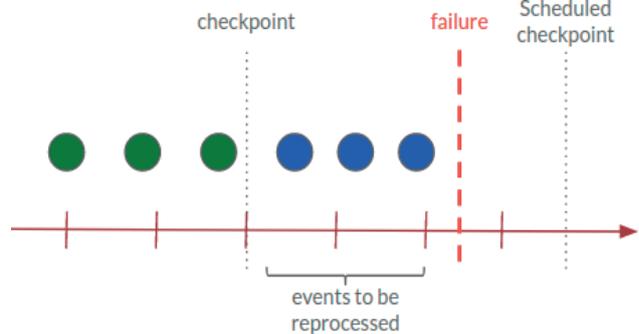


Fig. 4. Checkpoint and failure

**The Outgestion**

The process of communicating with external layers based on processed data. outgestion layer is pretty straightforward, all Processing job notifications are stored in a single Events hub topic. Then the outgestion pipeline reads them, transforms to the format-specific for the destination system, and pushes them there.

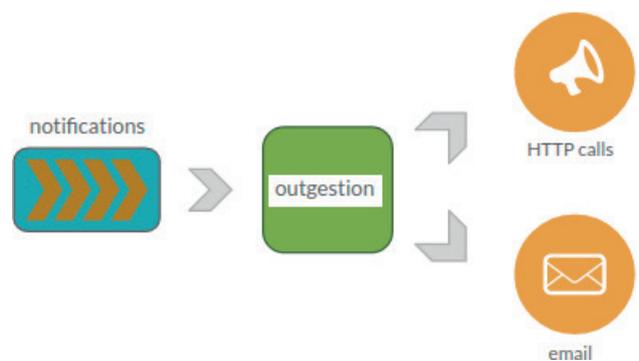


Fig. 5. Outgestion

**The technology stacks**

Regarding the technology stack that was

used, take a look at the list below, all components are based on a free and an open-sourced Apache product:

- Apache Flink - event processing engine. Provides flexible event time support. Fault-tolerant, high throughput and low latency.
- Apache Hadoop - a framework that allows for the distributed processing of large data sets across clusters of computers using simple programming models. In the provided solution, Hortonworks distributive is using.
- Apache Kafka - central events hub, where all events come through. Simple and reliable. The ingestion system saves data to it, the outgestion system is reading data from it for sending it further. It is the only component that communicates with Apache Flink directly.
- Apache NiFi - engine for managing ingestion and outgestion pipelines. NiFi collects data from data sources and transfers them to Apache Kafka. With NiFi it is possible to deploy different servers, for example, HTTP, FTP, etc.

### The Use Cases

In this section, I want to describe top-3 business use cases, which could be easily configured in the CEP and give win-win results when the whole system starts working.

1. **Balance top-up** – *If subscriber top-ups her balance too often in a short period of time. We can offer her a less expensive tariff or auto-payment services.*

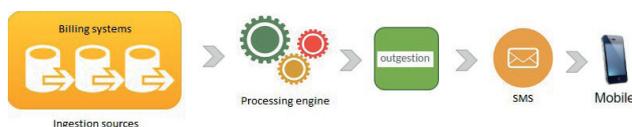


Fig. 6. Balance top-up

2. **Fraud detection** – *Send an email to the anti-fraud unit if a subscriber registered in roaming but his balance at the moment is equal to 0.*

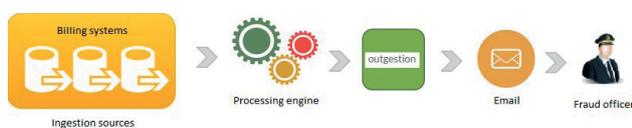


Fig. 7. Fraud detection

3. **Extra bonuses** – *Top-up subscriber balance with extra SMS/Voice usage/Internet usage bonuses when the subscriber fulfills all conditions at promo campaigns.*

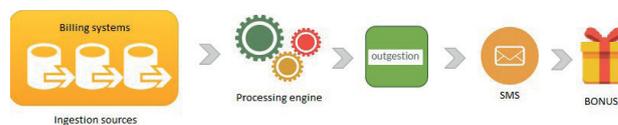


Fig. 8. Extra bonus

### Conclusion and future work

In this paper, the solution to how the CEP approach could be implemented in Telecom operator is presented, which helps to solve many technical limitations of our legacy systems and business requirements issues, process, and analyze the vast amounts of subscriber’s data in near real-time that was impossible before. Furthermore, we have defined triggers and business rules which could give a win-win effect after project launches. Apache components that are typically used in our architecture provide the possibility to build the CEP ecosystem, which will play a vital role in the next decade for the Telecom operator business. Ongoing work will focus on further optimization and improvement possibilities, some of the directions in which this work can be improved are:

- One of our approaches was to build one job to run all triggers/rules. However, any coin has a reserve side, and in our case, one bad rule could affect all other triggers/rules impacting a whole system. That is the main challenge that should be addressed in future works.
- Response latency time will be always an actual and crucial issue, due to the dynamicity of today’s business environments and requirements. We need to pay attention to how effectively ingestion and outgestion pipelines are executing the data traffic.
- Because data traffic is extremely huge and grows dramatically, the challenge is to continuously write and store data in Data Lake/ Data Warehouse and implement an Online Analytical Processing engine for analytical purposes and reports. Separating written data from data traffic should help to avoid performance and sustainability issues.

## REFERENCES

1. <https://datareportal.com/reports/digital-2019-global-digital-overview> .
2. Digital 2019: Global digital overview.
3. Using Complex Event Processing for Dynamic Business Process Adaptation.
4. Gabriel Hermosillo, Lionel Seinturier, Laurence Duchien. 2010 IEEE International Conference on Services Computing.
5. Processing Flows of Information: From Data Stream to Complex Event Processing.
6. Alessandro Margara, Gianpaolo Cugola
7. SoLoMo analytics for telco Big Data monetization.
8. H. Cao, W. S. Dong L, S. Liu, C. Y. Ma, W. H. Qian, J. W. Shi, C. H. Tian, Y. Wang, D. Konopnicki, M. Shmueli-Scheuer, D. Cohen, N. Modani, H. Lamba, A. Dwivedi, A. A. Nanavati, M. Kumar.
9. MigCEP: Operator Migration for Mobility Driven Distributed Complex Event Processing.
10. Beate Ottenwälder, Boris Koldehofe, Kurt Rothermel, Umakishore Ramachandran.
11. The 8 Requirements of Real-Time Stream Processing.
12. Michael Stonebraker, Ugur Çetintemel, Stan Zdonik.
13. Samza. <http://samza.apache.org>.
14. T. Akidau, A. Balikov, K. Bekiroglu, S. Chernyak, J. Haberman, R. Lax, S. McVeety, D. Mills, P. Nordstrom, and S. Whittle. Millwheel: Fault-tolerant stream processing at internet scale.
15. PVLDB, 6(11):1033-1044, Aug 2013
16. S. Kulkarni, N. Bhagat, M. Fu, V. Kedigehalli, C. Kellogg, S. Mittal, J. M. Patel, K. Ramasamy, and S. Taneja. Twitter heron: Stream processing at scale.
17. A. Toshniwal, S. Taneja, A. Shukla, K. Ramasamy, J. M. Patel, S. Kulkarni, J. Jackson, K. Gade, M. Fu, J. Donham, N. Bhagat, S. Mittal, and D. Ryaboy. Storm@twitter. In SIGMOD, pages 147–156, 2014
18. Realtime Data Processing at Facebook
19. Guoqiang Jerry Chen, Janet L. Wiener, Shridhar Iyer, Anshul Jaiswal, Ran Lei Nikhil Simha, Wei Wang, Kevin Wilfong, Tim Williamson, and Serhat Yilmaz Facebook, Inc
20. The Power of Events: An Introduction to Complex Event Processing in Distributed Enterprise Systems.
21. D. C. Luckham Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001

---

### Information about author:

1. Zhumeckenov A. – Faculty of Information Technology, Kazakh-British Technical University  
Email: zhumeckenov@gmail.com

## BIOMETRIC IDENTIFICATION OF A PERSON BY SEVERAL PARAMETERS

ZIYATBEKOVA G.Z.<sup>1,3</sup>, ALIASKAR M.S.<sup>1,2</sup>, ABZHALILOVA A.A.<sup>2</sup>,  
MONTAEVA D.N.<sup>2</sup>, TURLYBEKOVA A.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Information and Computational Technologies, 050000, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National university, 050000, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Kazakh National Agrarian university, 050000, Almaty, Kazakhstan

**Abstract.** The article is devoted to the development of a system of biometric identification of a person by face, fingerprints and voice. Two-dimensional and three-dimensional characteristics of a person's face, taking into account area and volume, were used as informative signs of biometric identification of a person by face. A complex identification algorithm has been developed to account for such phenomena as portrait shift, different photo scales, and the tilt of the identified face. The FPM10A scanner and the Arduino microcontroller are used for biometric identification of a person by fingerprints.

Identification signs are based on the analysis of the structure of papillary patterns on the finger: type and type of papillary pattern; direction and steepness of streams of papillary lines; the structure of the central pattern of the pattern; delta structure; the number of papillary lines between the center and the delta and many other signs. Another type of feature is local. They are also called minutiae (features or special points) — unique features inherent only in a particular print, determining the points of change in the structure of papillary lines (end, split, break, etc.), the orientation of papillary lines and coordinates at these points. Each print can contain up to 70 or more minutations.

For biometric identification of a person by voice, MFC and PLP algorithms for digital processing and analysis of audio recordings are used. Various algorithms are used for acoustic speech analysis: hidden Markov models, a model of a mixture of Gaussian distributions. The result of determining the tone of speech and the content of speech for the purposes of voice identification is obtained.

The Visual FoxPro DBMS has developed a «multiparametric automated system for biometric identification of an individual».

**Keywords:** information security, two-dimensional and three-dimensional image, identification, papillary patterns, voice characteristics, human speech, acoustic modeling.

## ТҰЛҒАНЫ БІРНЕШЕ ПАРАМЕТРЛЕР БОЙЫНША БИОМЕТРИЯЛЫҚ СӘЙКЕСТЕНДІРУ

ЗИЯТБЕКОВА Г.З.<sup>1,3</sup>, АЛИАСКАР М.С.<sup>1,2</sup>, АБЖАЛИЛОВА А.А.<sup>2</sup>,  
МОНТАЕВА Д.Н.<sup>2</sup>, ТУРЛЫБЕКОВА А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ақпараттық және Есептеуіш технологиялар институты, 050000, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Қазақ Ұлттық аграрлық зерттеу университеті, 050000, Алматы, Қазақстан

**Аңдатпа.** Мақала адамды бет, саусақ іздері мен дауысы бойынша биометриялық сәйкестендіру жүйесін жасауға арналған. Адамның бетінің екі өлшемді және үш өлшемді сипаттамалары, ауданы мен көлемін ескере отырып, тұлғаны биометриялық сәйкестендірудің ақпараттық белгілері ретінде қолданылады. Портреттік жылжу, әртүрлі фотосуреттер және сәйкестендірілген адамның қозғалысы сияқты құбылыстарды ескертін кешенді сәйкестендіру алгоритмі жасалды.

Саусақ іздері бойынша адамды биометриялық сәйкестендіру үшін FPM10A сканері және Arduino микроконтроллері пайдаланылды. Сәйкестендіру белгілері саусақтағы папиллярлы өрнектердің құрылымын талдауға негізделген: папиллярлық өрнектің түрі мен түрі; папиллярлық сызықтар

ағындарының бағыты және тік болуы; өрнектің орталық суретінің құрылымын; дельта құрылымы; орталық пен дельта арасындағы папиллярлық сызықтардың саны және көптеген басқа белгілер.

Белгілердің тағы бір түрі – жергілікті. Оларды минуция деп те атайды (ерекшеліктер немесе арнайы нүктелеріне байланысты) – папиллярлық сызықтар құрылымының өзгеру нүктелерін анықтайтын (аяқталу, екіге таралу, үзілісті және т.б.), папиллярлық сызықтардың бағытын анықтайтын белгілі бір ізге ғана тән ерекше белгілер және осы нүктелердегі координаттар. Әрбір саусақ ізі 70 немесе одан да көп минуцияны қамтуы мүмкін.

Адамды дауыспен биометриялық сәйкестендіру үшін MFCC және PLP алгоритмдері цифрлық өңдеу және аудиожазбаларды талдау үшін қолданылды. Сөйлеудің акустикалық талдауы үшін сан түрлі алгоритмдер қолданылды: жасырын Марков модельдері, Гаусс үлестірімесінің қоспасының моделі. Дауыспен сәйкестендіру мақсатында сөйлеу тонын және сөйлеу мазмұнын анықтаудың нәтижесі алынады. «Адамды биометриялық сәйкестендірудің көп параметрлі автоматтандырылған жүйесі» Visual FoxPro ДҚБЖ-да жасалған.

**Түйінді сөздер:** ақпараттық қауіпсіздік, екі өлшемді және үш өлшемді сурет, сәйкестендіру, папиллярлық өрнектер, дауыстық сипаттама, адамның сөйлеуі, акустикалық модельдеу.

## БИОМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИЧНОСТИ ПО НЕСКОЛЬКИМ ПАРАМЕТРАМ

ЗИЯТБЕКОВА Г.З.<sup>1,3</sup>, АЛИАСКАР М.С.<sup>1,2</sup>, АБЖАЛИЛОВА А.А.<sup>2</sup>,  
МОНТАЕВА Д.Н.<sup>2</sup>, ТУРЛЫБЕКОВА А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт Информационных и Вычислительных технологий, 050000, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, 050000, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский Национальный аграрный исследовательский университет, 050000, Алматы, Казахстан

**Аннотация.** Статья посвящена разработке системы биометрической идентификации человека по лицу, отпечаткам пальцев и голосу. В качестве информативных признаков биометрической идентификации человека по лицу использованы двумерные и трехмерные характеристики лица человека, учитывающие площадь и объем. Для учета таких явлений, как сдвиг портрета, разный масштаб фотографий и наклон идентифицируемого лица, разработан сложный алгоритм идентификации.

Для биометрической идентификации человека по отпечаткам пальцев использован сканер FPM10A и микроконтроллер Arduino. Идентификационные признаки основаны на анализе строения папиллярных узоров на пальцах: тип и вид папиллярного узора; направление и крутизна потоков папиллярных линий; строение центрального рисунка узора; строение дельты; количество папиллярных линий между центром и дельтой и множество других признаков.

Другой тип признаков — локальные. Их также называют минуциями (особенностями или особыми точками) — уникальные признаки, присущие только конкретному отпечатку, определяющие пункты изменения структуры папиллярных линий (окончание, раздвоение, разрыв и т.д.), ориентацию папиллярных линий и координаты в этих пунктах. Каждый отпечаток может содержать до 70 и более минуций.

Для биометрической идентификации человека по голосу использованы алгоритмы MFCC и PLP для цифровой обработки и анализа аудиозаписей. Для акустического анализа речи применены различные алгоритмы: скрытые марковские модели, модель смеси гауссовских распределений. Получен результат определения тональности речи и содержательности речи для целей идентификации по голосу. На СУБД Visual FoxPro разработана «Многопараметрическая автоматизированная система биометрической идентификации личности».

**Ключевые слова:** защита информации, двухмерное и трехмерное изображение, идентификация, папиллярные узоры, характеристика голоса, человеческая речь, акустическое моделирование.

### Introduction

The problem of information protection and information security is one of the most important aspects of the development of modern society. Currently, the solution to this problem in the field of development and operation of information systems for various purposes is associated with the development of various requirements to ensure their security and the creation of software and hardware against unauthorized access [1-2].

Automatic human recognition for identification has a large number of applications in various fields. The problems of public security, the need for remote authentication, and the development of human-machine interfaces arouse increased interest in this technology [3].

### Methods

Biometric identification methods are increasingly used in access control systems to workplaces, mobile devices, local and global information resources. Since the implementation of the systems does not require specialized equipment, and the biometric feature cannot be lost, forgotten or transferred, the most promising are systems based on human face recognition.

Authentication methods based on the measurement of human biometric parameters provide 100% identification. At the moment, biometric systems successfully use the following biometric characteristics for user authentication: iris, fingerprint, palm print, vascular patterns, face geometry, voice print, signature, DNA comparison, which have properties without which their practical application is impossible [4]:

Authentication methods based on the measurement of a person's biometric parameters provide 100% identification. At the moment, biometric systems successfully use the following biometric characteristics for user authentication: iris, fingerprint, palm print, vascular patterns, face geometry, voice print, signature and DNA comparison, which have properties without which their practical application is impossible [4]:

Universality: each person has biometric characteristics.

Uniqueness: there are no two people with exactly the same biometric characteristics.

Consistency: biometric characteristics must be stable over time.

Measurability: biometrics must be measurable by some physical reading device.

Currently, there are no biometric parameters that combine all these properties at the same time, especially when considering acceptability. Therefore, the use of multiparametric biometric authentication becomes relevant.

### Results. Main part

The Visual FoxPro DBMS was selected for the software implementation of the «Biometric Information Security System».

Visual FoxPro is a Relational Database Management System based on an object-oriented, visually programmable programming language. Starting with the ninth version of Visual FoxPro, a set of GDI Plus and MCI classes is available [5].

The main property of GDI Plus for its use in the software implementation of the workstation «Biometric Information Security System» is the following:

- ability to load and save images from a file, from a table field, or from a variable;
- ability to get information about the image (determining the size of the raster, the resolution of the raster, the graphic format);
- the ability to perform a number of operations on the image (rotation and reflection, clipping a rectangular fragment, resizing the image, interpolation);
- ability to draw independently in the form window;
- ability to print images on the printer.

With MCI, you can record, play back audio and video files of various formats.

Currently included as biological characteristics are «face video», «fingerprint» and «voice».

The following types are introduced for characteristics parameters:

- 1 – point coordinate; 2 – distance (number);
- 3 – area; 4 – volume.

The program implements various agglomerative classification algorithms: flexible strategy, nearest neighbor strategy, far neighbor strategy, group mean strategy, centroid strategy, sum of squares strategy [6].

### Face video

A number of parameters have been defined to characterize the «face video», which are:

- 1) point – coordinates of the pupils of the eyes, bridge of the nose, tip of the nose,

2) distance – between the eyes, between the bridge of the nose and the tip of the nose, the base of the nose,

3) perimeter – triangle (pupils of the eyes and tip of the nose), triangle (bridge of the nose and base of the nose),

4) area – isolines of the eye sockets, isolines of the nose,

5) volume – eye sockets, nose.

A volumetric 3d-model, presented as a regular DEM, is used as the initial data for the «face video».

### Fingerprint

The FPM10A module with the Adafruit Arduino library was used to create a biometric fingerprint identification system block [7].

The optical fingerprint scanner is a module that can be used in conjunction with Arduino and other microcontrollers [7]. Capable of storing fingerprints (1000 fingerprints) in memory with their further identification. Used in places of high secrecy, as a kind of password access key based on scanning and verifying fingerprints with a database.

There are two main steps when using a fingerprint sensor. First, data is written into the sensor's memory, that is, a unique ID is assigned to each fingerprint, which will be used for comparison in the future. After recording the data, you

can proceed to the “search”, comparing the current image of the fingerprint with those recorded in the sensor's memory.

New fingerprints are loaded using the SFG Demo and Arduino IDE programs, assigning a new ID # to each. All uploaded fingerprint images are encrypted (Figure 1).

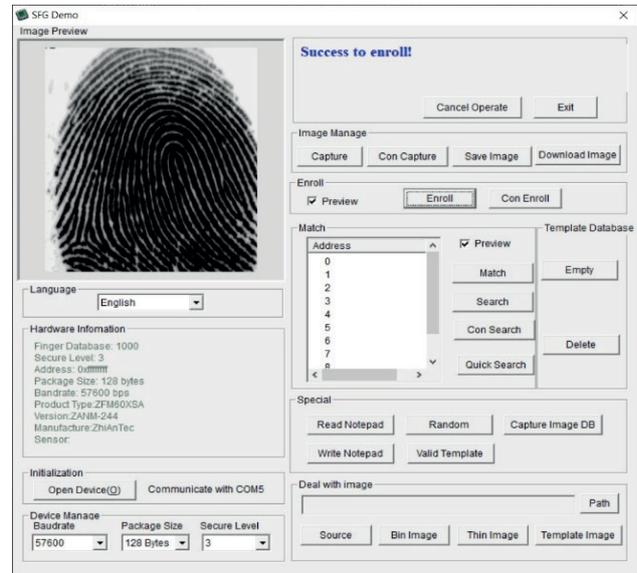


Figure 1 – Uploading the fingerprint to the database

In Figure 2, you can see the percentage of matches. Fingerprints that do not match those stored in the database are ignored by the scanner.

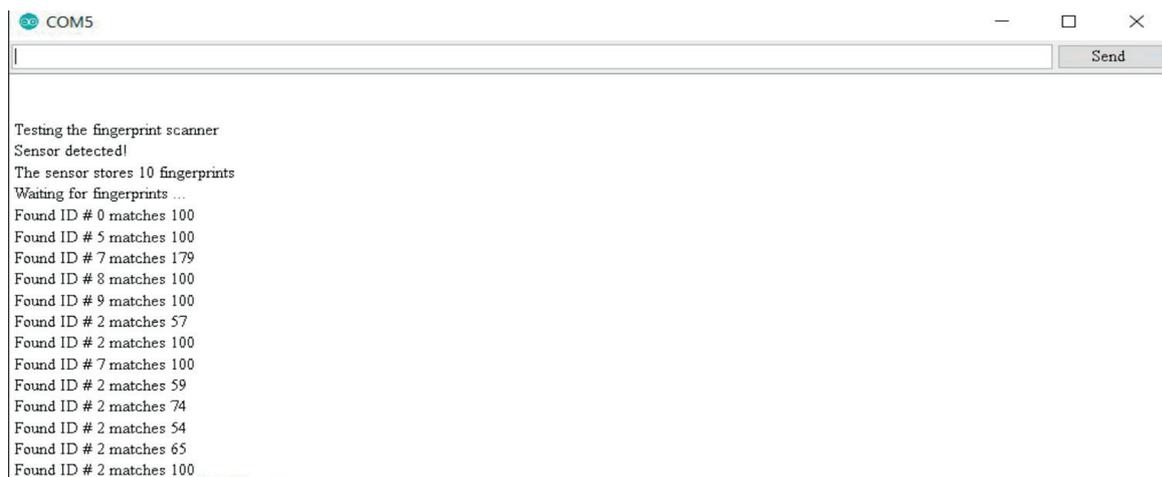


Figure 2 – Fingerprint recognition

Identification signs of the structure of papillary patterns on the fingers are usually subdivided into global and local signs [8].

Global signs include signs that can be seen with the naked eye. These features include: type

and type of papillary pattern; direction and steepness of streams of papillary lines; the structure of the central pattern of the pattern; delta structure; the number of papillary lines between the center and the delta and many other signs.

Another type of signs is local. They are also called minutiae (features or special points) - unique features inherent only in a specific imprint, determining the points of change in the structure of papillary lines (ending, bifurcation, break, etc.), the orientation of the papillary lines and coordinates at these points. Each print can contain up to 70 or more minutiae.

### **Voice**

One of the parameters of biometric personality identification is voice. Voice identification technology is used in various areas of information security, access control systems, forensic science and other areas [8-9].

Oral speech of a person is an ordered system of acoustic signals, which are perceived as a sound image, in the oral speech of a person his individual signs and characteristics are reflected. The individuality of the voice is a consequence of the shape and size of the mouth and nose, throat and respiratory organs. Thus, the physical characteristics of sounds - frequency, duration, intensity - are strictly individual for each person. The task of voice identification is to separate human speech from the input audio stream, its classification and recognition.

Since the human voice is the sum of many separate frequencies created by the vocal cords, there are several features that can be observed and analyzed in the speech of each person:

- Vocal speech (loudness, tempo, stability - physical components);
- Tonality of speech (intonation - psychological components);
- Content of speech (vocabulary of a specific person).

### **Discussion**

The difference in timbres of different voices is described by different frequency spectra. The mathematical apparatus for analyzing the frequency spectrum is the Fourier transform, as a way to describe a complex sound wave with a spectrogram. When calculating the second-order spectrogram, harmonics are identified, which are called «cepstrum», they are not convenient for analysis, since they duplicate information, an example of such a harmonic, uniform background noise or music in a song [10].

### **Conclusion**

Workstation «Biometric information security system» has been developed. Based on the preliminary classification of objects, the search for a given person in the source database is accelerated. Based on the use of multi-criteria optimization methods, different coefficients are calculated for each class, which allow ranking the criteria by importance. The properties of the proposed mathematical algorithm are investigated. For the first time, the human recognition algorithm takes into account such parameters as the volume of the nose, the volume of the eye socket, and other three-dimensional characteristics. To speed up identification, all data in the source database is pre-classified.

A complex identification algorithm has been developed to account for such phenomena as portrait shift, different photo scales, and the tilt of the identified face. Numerical studies conducted on the model problem have shown the effectiveness of human recognition when changing the scale of a photo. Based on the Arduino microcontroller and the FPM10A scanner, a recognition system has been developed for storing data, further processing it, identifying and displaying fingerprint images. The structure of the structure of papillary patterns on the fingers was selected as identification features. The result of matching fingerprints with different rotations through the scanner is obtained. A promising area is the search for an incomplete fingerprint, since often in practice there is only a part of the fingerprint to search for matches.

The system has developed three algorithms for analyzing audio recordings to solve the problem of biometric identification by voice.

### **Acknowledgment**

The work was carried out at the expense of grant funding for research for 2020-2022 under the project №AP08856579 «Development of scientific and technological approaches to the production and study of the properties of silicon nanostructures decorated with carbon nanoparticles for modern nanophotonics and sensorics» at the Institute of Information and Computational Technologies, the Committee of science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan.

## REFERENCES

1. G.A. Buzov. Practical guide to identifying special technical means of unauthorized obtaining of information. – M.: Hot line – Telecom, 2010. – 240 p.
2. U.F. Katorin, A.V. Razumovskiy, A.Y. Spivak. Protection of information by technical means. – Saint Petersburg: NRU ITMO, 2012. – 416 p.
3. R.M. Bolle, J.H. Connel, S. Pankanti, N.K. Ratha, A.W. Senior. Guide to Biometrics, Springer-Verlag New York, 2004.
4. S. Crihalmeanu, A. Ross. Multispectral sclera patterns for ocular biometric recognition, Pattern Recognition. Lett. 33 (2012)1860–1869.
5. V.B. Klepinin, T.P. Agafonov. Visual FoxPro 9.0. The most complete guide. – Saint Petersburg.: BHV-Petersburg, 2007. – 1216 p.
6. S.A. Ayvazyan, V.M. Buchberger, I. S. Enyukov, L. D. Meshalkin. Applied statistics. Classification and dimensionality reduction. – M.: Finance and statistics, 1989. – 607 p.
7. V. A. Petin. Projects using the Arduino controller. – Saint Petersburg.: BHV-Petersburg, 2016. – 464 p.
8. Tan and B. Bhanu. Robust fingerprint identification, in International Conference on Image Processing 2002. – Vol. 1. – IEEE. P. 1-277.
9. Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski: «ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF», Computer Vision (ICCV), IEEE International Conference on IEEE, 2011. – P. 2564-2571.
10. Dzmitry Bahdanau, Kyunghyun Cho, and Yoshua Bengio. Neural machine translation by jointly learning to align and translate. CoRR, abs/1409.0473, 2014.

---

### Information about authors:

1. Ziyatbekova Gulzat Ziyatbekkyzy – Doctor PhD, Art. Lecturer of the Department of Information Systems, Faculty of Information Technologies, KazNU named after al-Farabi  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9290-6074>  
Email: ziyatbekova@mail.ru
2. Aliaskar Magzhan Sundetovich – 2nd year PhD student, KazNU named after al-Farabi  
Email: 87019931011@mail.ru
3. Abjalilova Aisha Akhmetkyzy – 2nd year Master student, KazNU named after al-Farabi  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2565-3812>  
Email: aishakz\_97@mail.ru
4. Montaeva Diana Narynbekovna – 2nd year Master student, KazNU named after al-Farabi  
Email: dianamonti24@gmail.com
5. Turlybekova Arailym Nurzhanovna – 2nd year Master student, KazNU named after al-Farabi  
Email: araylym.turlybekova@samgau.com

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЙВАНИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ  
ВОЗДУХА В РЕЗУЛЬТАТЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ОТ ТЕПЛОВОЙ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ****ИСАХОВ А.А.<sup>1,2</sup>, АЛИМБЕК А.К.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, 050000, Алматы, Казахстан<sup>2</sup>Казахстанско-Британский технический университет, 050000, Алматы, Казахстан

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты, полученные путем численного моделирования распространения загрязняющих веществ, образующихся при сжигании топлива на электрической теплоэлектростанции, и их химическая реакция в атмосфере. На примере реальной теплоэлектростанции (Экибастузская ГРЭС-1) была смоделирована дисперсия  $NO$  и продукт  $NO_2$  при химической реакции с кислородом. Примечательной особенностью данной теплоэлектростанции является то, что разница между дымоходами позволяет изучить влияние высоты источника на дисперсию загрязнения. Для описания этого процесса использовались уравнения Навье – Стокса, состоящие из уравнения неразрывности и движения. Для проверки математической модели и численного алгоритма численно решались тестовые задачи. Целью данной работы было изучение уровня концентрации загрязнения на разных расстояниях от источника. В результате были определены массовые доли концентрации и продукта. Согласно полученным данным, с увеличением расстояния от источника концентрация загрязнения распространяется более широко под влиянием диффузии. Чем дальше расстояние от трубы, тем ниже концентрация вещества. В результате численного исследования полученные данные могут быть использованы для дальнейших исследований проблем, связанных с распространением загрязняющих веществ в атмосфере для реальных атмосферных условий, также могут позволить в будущем спрогнозировать оптимальное расстояние от жилых районов для строительства ТЭС, при котором концентрация выбросов будет оставаться на безопасном уровне.

**Ключевые слова:** химическая реакция, рассеивание загрязнителей воздуха, тепловая электростанция, струя в поперечном потоке, осреднение Навье – Стокса по Рейнольдсу (RANS)

**ЖЫЛУ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНАН ХИМИЯЛЫҚ РЕАКЦИЯ  
НӘТИЖЕСІНДЕ ПАЙДА БОЛАТЫН АУА ЛАСТАУШЫЛАРЫНЫҢ  
ТАРАЛУЫН САНДЫҚ ЗЕРТТЕУ****ИСАХОВ А.А.<sup>1,2</sup>, АЛИМБЕК А.К.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан<sup>2</sup>Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан

**Аңдатпа.** Жылу электр станцияларында отынды жағу кезінде пайда болатын ластаушы заттардың таралуын және олардың атмосферадағы химиялық реакциясын сандық модельдеу арқылы алынған нәтижелер келтірілген. Нақты жылу электр станциясының (Екібастұз МАЭС-1) мысалында  $NO$  дисперсиясы мен оттегімен химиялық реакция кезінде пайда болатын  $NO_2$  өнімі модельденді. Бұл жылу электр станциясының бір ерекшелігі – мұржалар арасындағы айырмашылық биіктіктің ластану дисперсиясына әсерін зерттеуге мүмкіндік береді. Осы процесті сипаттау үшін үзіліссіздік және қозғалыс теңдеулерінен тұратын Навье – Стокс теңдеуі қолданылды. Математикалық модель мен сандық алгоритмді тексеру үшін тесттік есеп сандық шешілді. Жұмыстың мақсаты әртүрлі қашықтықта ластану концентрациясының деңгейін зерттеу болды. Нәтижесінде концентрация мен өнім концентрациялары анықталды. Алынған мәліметтерге сәйкес, ластаушы көзінің жоғарылауымен ластану концентрациясы диффузияның әсерінен кеңірек таралады. Құбырдан қашықтық неғұрлым

алыс болса, ластаушы концентрациясы соғұрлым төмен. Сандық зерттеу нәтижесінде алынған мәліметтер нақты атмосфералық жағдайлар үшін атмосфераға ластаушы заттардың таралуына байланысты проблемаларды одан әрі зерттеу үшін пайдаланылуы мүмкін, сонымен қатар болашақта шығарындылардың шоғырлануы қауіпсіз деңгейде болатын ЖЭС салу үшін тұрғын аудандардан оңтайлы қашықтықты болжауға мұрындық болады.

**Түйінді сөздер:** Химиялық реакция, ауа ластаушыларының таралуы, жылу электр станциясы, көлденең ағын, Рейнольдс бойынша Навье-Стокс орташалануы (RANS).

## NUMERICAL STUDY OF THE DISPERSION OF AIR POLLUTANTS AS A RESULT OF CHEMICAL REACTIONS IN A THERMAL POWER PLANT

ISSAKHOV A.A.<sup>1,2</sup>, ALIMBEK A.K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National university, 050000, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kazakh-British technical university, 050000, Almaty, Kazakhstan

**Abstract.** This article presents the results obtained by numerical modeling of the spread of pollutants formed during the combustion of fuel at an electric thermal power plant and their chemical reaction in the atmosphere. On the example of a real thermal power plant (Ekibastuz SDPP-1), the dispersion of NO and the product of NO<sub>2</sub> was modeled during a chemical reaction with oxygen. A notable feature of this thermal power plant is that the difference between the chimneys makes it possible to study the influence of the height of the source on the dispersion of pollution. To describe this process, the Navier - Stokes equations were used, consisting of the equation of continuity and motion. To check the mathematical model and the numerical algorithm, test problems were solved numerically. The aim of this work was to study the level of pollution concentration at different distances from the source. As a result, the mass fractions of concentration and product were determined. According to the data obtained, with increasing distance from the source, the concentration of pollution spreads more widely under the influence of diffusion. The further the distance from the pipe, the lower the concentration of the substance. As a result of a numerical study, the data obtained can be used for further studies of the problems associated with the spread of pollutants into the atmosphere for real atmospheric conditions, and can also allow in the future to predict the optimal distance from residential areas for the construction of thermal power plants, at which the concentration of emissions will remain at a safe level.

**Key words:** Chemical reaction; air pollutant dispersion; thermal power plant; jet in crossflow; Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS)

### Введение

Атмосферный воздух - жизненно важный компонент окружающей среды. Постоянное негативное воздействие на атмосферу и неудовлетворительное решение вопросов, связанных с ее оздоровлением, негативно сказываются на здоровье населения. Загрязнение воздуха создается в результате деятельности промышленных предприятий, электростанций, автомобилей, которые выбрасывают в атмосферу сотни тонн вредных веществ. В воздушном бассейне постоянно происходят фотохимические процессы, приводящие к появлению новых соединений, иногда более вредных, чем исходные. Тепловые электростанции - один из основных источников

загрязнения окружающей среды. Тепловые электростанции производят электроэнергию (до 75% от общего мирового производства электроэнергии) и тепловую энергию. При горении основная часть топлива превращается в отходы, которые попадают в окружающую среду в виде газообразных и твердых продуктов сгорания. При сжигании топлива расходуется большое количество кислорода, а выделяется значительное количество продуктов сгорания. Загрязнители воздуха можно разделить на два класса. К первому классу относятся первичные загрязнители воздуха [1], которые выбрасываются в атмосферу непосредственно из источников выбросов (обычно в результате сжигания топлива) и в

основном состоят из оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) - в основном  $\text{NO}$ , летучих органических соединений (VOCS), углерода, монооксида ( $\text{CO}$ ) и компонентов твердых частиц [2]. Второй класс — это вторичные загрязнители воздуха, которые образуются в атмосфере, в то время как первичные загрязнители воздуха подвергаются физическим и химическим реакциям [3]. Химические реакции приводят к разбавлению реагентов и образованию вторичных загрязнителей, которые зависят от концентрации загрязняющих веществ, температуры и химической кинетики [4,5]. Одним из важных вторичных загрязнителей воздуха является озон ( $\text{O}_3$ ), который образуется в результате химических реакций, включая, главным образом, окисление ЛОС и  $\text{NO}_x$  в присутствии солнечного света. Реактивные промежуточные соединения (гидроксильный радикал ( $\text{OH}$ ) и гидропероксильный радикал ( $\text{HO}_2$ )) регулируют цикл химического разложения, превращая  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_x$  и, следовательно, образование  $\text{O}_3$  [6]. В работах [7,8,9] были численно исследованы механизмы образования  $\text{NO}$  в химическом составе, который включал 45 видов и 142 реакции. Чтобы смоделировать такие задачи реального размера, необходимо решить тестовую задачу. Данной тестовой задачей была проверена точность численного алгоритма. Полученные данные сравнивали со значениями эксперимента. Удовлетворительно получено согласие с данными измерений. Значения показали более близкое согласие со значениями измерений, чем значения моделирования других авторов.

### Математическая модель

CFD-моделирование таких процессов основано на уравнениях Навье – Стокса, состоящее из уравнения неразрывности и движения [10-13].

- Уравнение неразрывности:

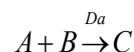
$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

- Уравнение движения:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho g_i \hat{n} \quad (2)$$

- Химическая реакция:

Вещество В, выходящее из трубы, вступает в реакцию с веществом А основного течения, в результате образуется вещество С.



Вещества подобраны таким образом, что число Дамкёлера равно 1.

- Уравнение для концентрации:

Для расчета переноса концентрации были использованы уравнения для компонентов  $Y_A$  и  $Y_B$ .

$$\rho \left( \frac{\partial Y_A}{\partial t} + u \frac{\partial Y_A}{\partial x} + v \frac{\partial Y_A}{\partial y} + w \frac{\partial Y_A}{\partial z} \right) = \rho \Gamma_A \left( \frac{\partial^2 Y_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Y_A}{\partial z^2} \right) + \omega_A \quad (3)$$

$$\omega_A = -Da Y_A Y_B$$

$$\rho \left( \frac{\partial Y_B}{\partial t} + u \frac{\partial Y_B}{\partial x} + v \frac{\partial Y_B}{\partial y} + w \frac{\partial Y_B}{\partial z} \right) = \rho \Gamma_A \left( \frac{\partial^2 Y_B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Y_B}{\partial z^2} \right) + \omega_B \quad (4)$$

$$\omega_B = \omega_A$$

$Y_C$  вычисляется согласно закону Дальтона:

$$Y_C = 1 - Y_A - Y_B \quad (5)$$

Система уравнений записана в декартовой системе координат  $x_i (i=1, 2, 3)$ , в физическом пространстве; три компоненты скорости  $u, v, w$  - давление;  $\mu$  - динамическая вязкость,  $\nu = \mu / \rho$  - кинематическая вязкость,  $\rho$  - плотность,  $\Gamma$  - диффузионный коэффициент,  $t$  - безразмерное время.

Для численного решения системы уравнений (1)-(2) используется численный алгоритм SIMPLE (полуявный метод для уравнений, связанных давлением), представленный Патанкарком и Сполдинггом [13].

### Тестовая задача для компонентов поля скорости и концентрации

В этом разделе обсуждается следующая тестовая задача. Подробное описание этой тестовой задачи и эксперимента дано в [14,15]. В работе [14] были рассмотрены различные соотношения струи к поперечному потоку  $R$  (0,5, 1,0 и 1,5). При  $R=0.5$  считалось, что скорость струи составляла 5.5 м/с, скорость поперечного потока – 11 м/с. В качестве материала был выбран воздух. Диаметр струи составлял  $D=12,7$  мм. Число Рейнольдса определяется следующим образом:

$$Re = \frac{\rho V_{jet} D}{\mu} = 4700.$$

Для описания начального профиля скорости поперечного потока в пограничном слое использовался 1/7 степенной закон ветра

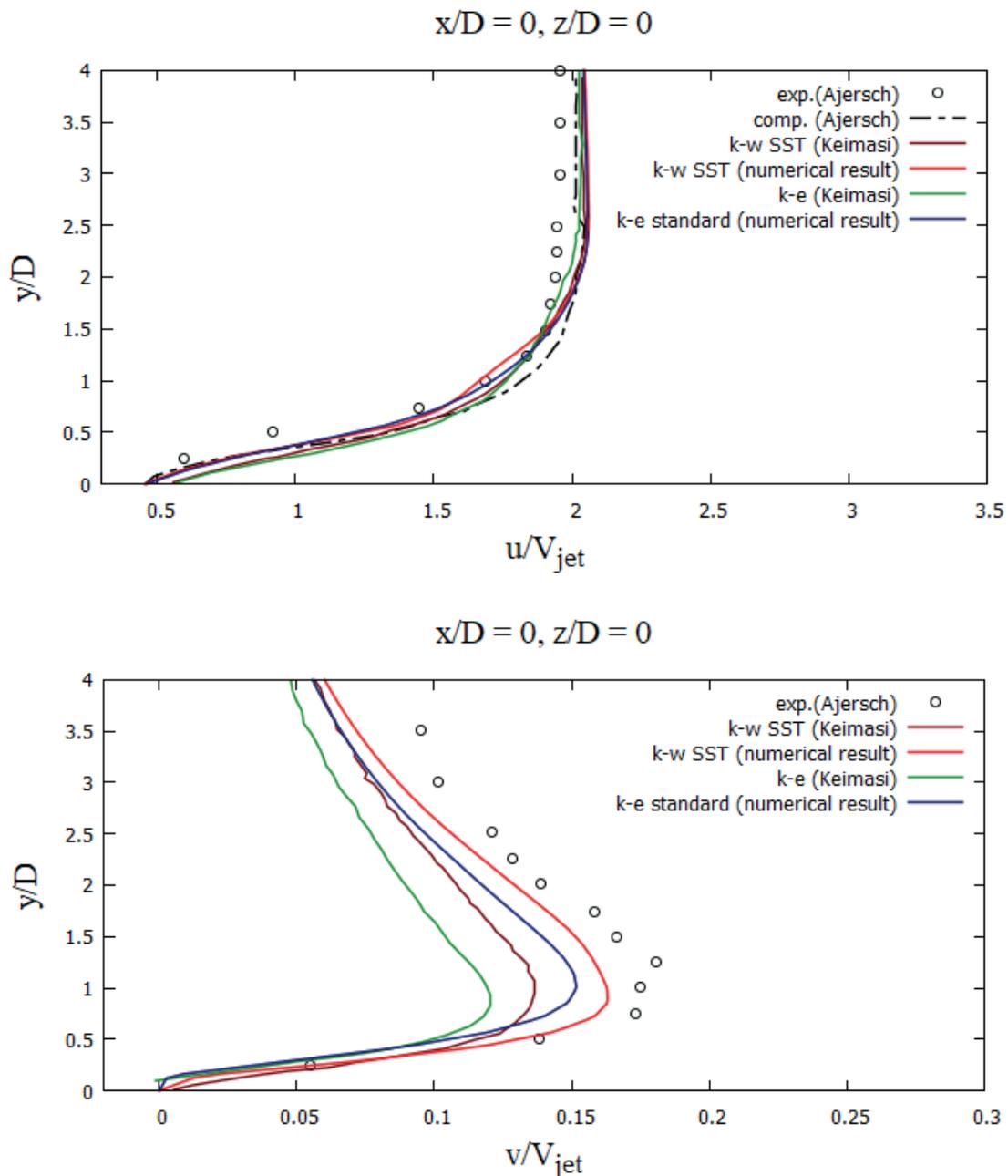
$$\frac{u}{u_r} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha$$

На высоте более 2D скорость по оси X была задана стационарно, равная 11 м/с. Для вертикального канала была установлена стационарная скорость по оси Y, равная 5.5 м/с.

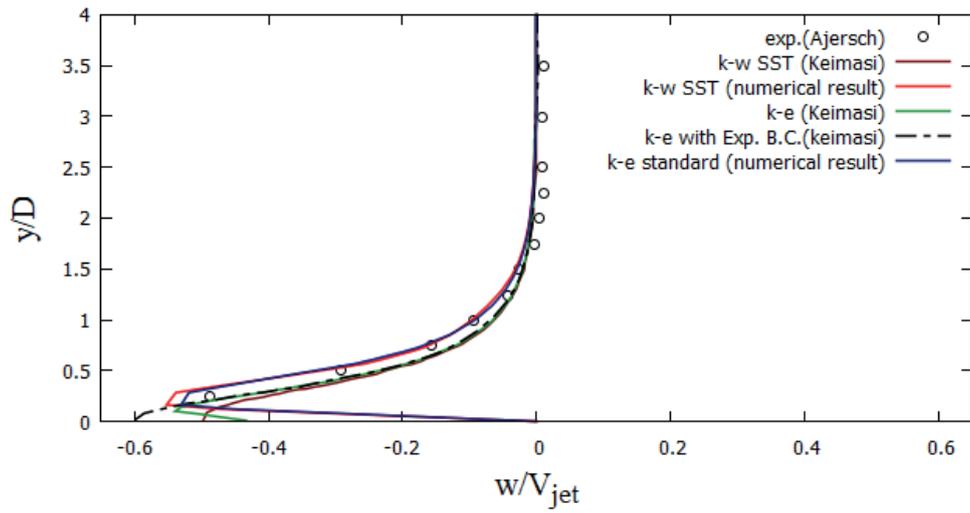
Здесь  $u$  - скорость ветра на высоте  $z$ , а  $z_r$  - известная скорость ветра на эталонной высоте  $z_r$ .  $\alpha$  - полученный эмпирически коэф-

фициент, который изменяется в зависимости от стабильности атмосферы. Здесь  $\alpha=1/7$  для условий нейтральной устойчивости. Такие значения скорости были заданы с целью повторения эксперимента, проделанного в работе [14].

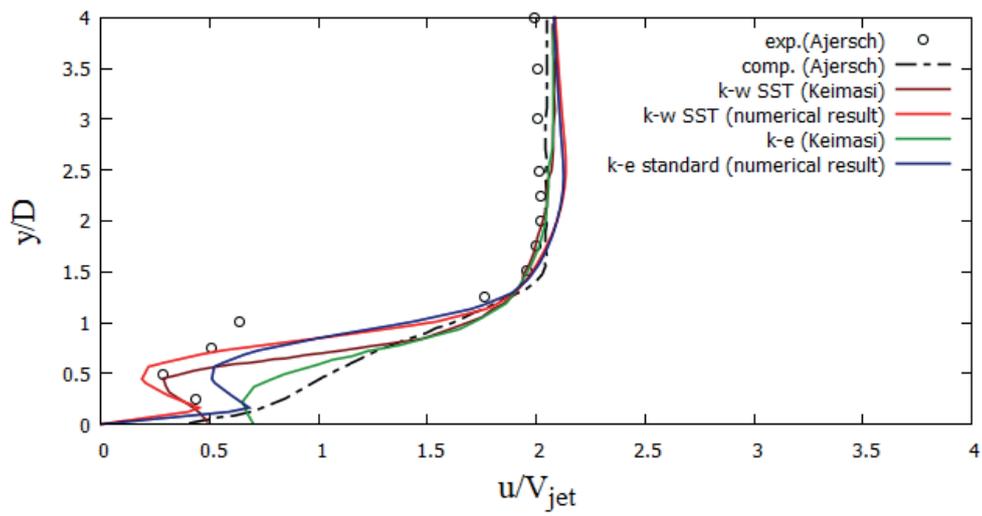
На рисунке 1 показаны сравнения численных результатов данного исследования с вычислительными решениями [14] и экспериментальными данными [15]. Как видно в результатах, оптимальной моделью оказалась k-w SST. Для задачи в реальных размерах мы будем использовать модель k-w SST.



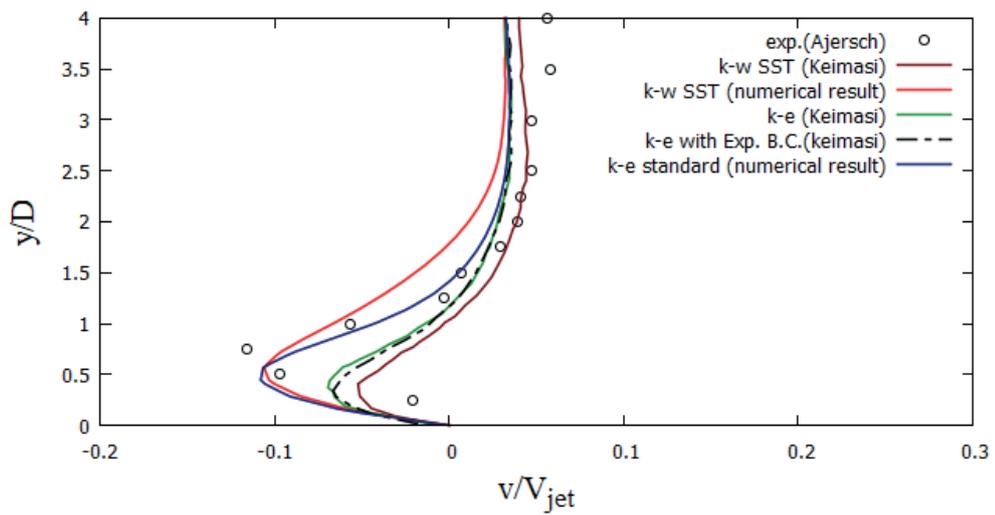
$x/D = 0, z/D = -0.5$



$x/D = 3, z/D = 0$



$x/D = 3, z/D = -1.0$



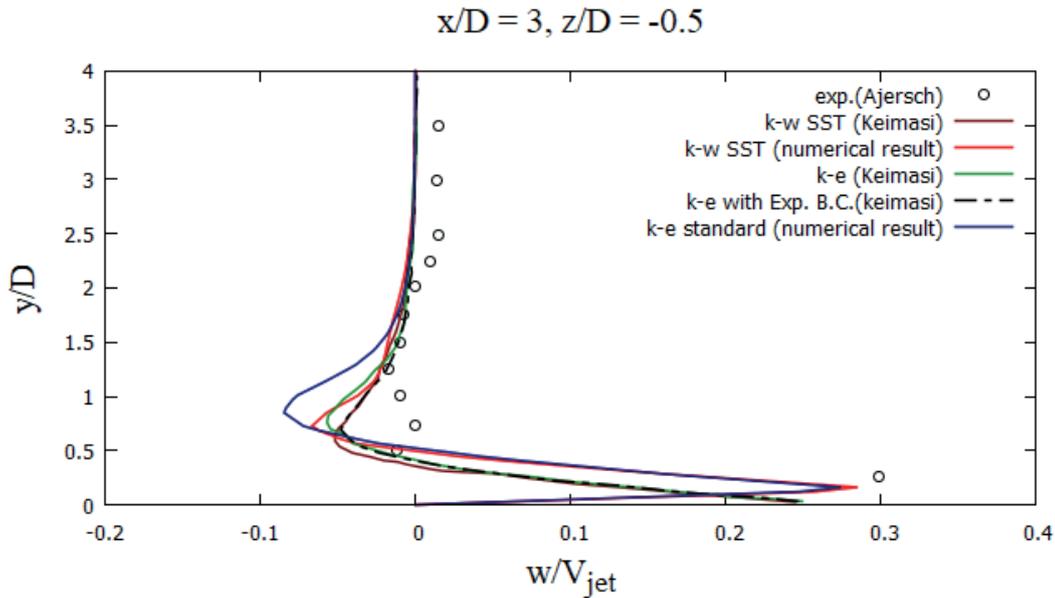


Рис. 12 – Сравнение профилей для скоростей  $u, v, w$  в указанных точках

### Реальная задача

В данной работе была рассмотрена реальная модель распределения загрязняющих веществ от Экибастузской ГРЭС-1. Вычислительная область представляет собой трехмерную коробку с трубой внутри нее. На этой ТЭС загрязнение выделяется из двух дымоходов (300 и 330 м). Расстояние между дымоходами составляет 200 м. Диаметры дымоходных отверстий – 10 м. В качестве загрязняющего вещества от ТЭС выбрасываются в большом количестве газы  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $CO$  и др. Эти загрязнители в атмосфере вступают в реакцию с кислородом и водяным паром. В данной работе рассматривается реакция:  $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$ . Как говорилось ранее, полученный продукт более вредный, чем исходный. Вычислительная сетка была сгущена в области траектории движения загрязнения, в которой произвелось сгущение области, где расположены строения (сетка до 20 м), а затем сгущение к зданиям (сетка до 5 м) и к трубам (сетка до 2 м). Она состоит из 218 915 узлов и 1 244 098 элементов.

Для описания начального профиля скорости поперечного потока в пограничном слое использовался  $1/7$  степенной закон ветра, как в работе [14]. Отношение скорости струи к скорости поперечного потока  $R=0.5$ . Ско-

рость струи составляла 1.5 м/с, скорость поперечного потока – 3 м/с.

### Численные результаты

Моделирование выполнялись в физических размерах. Число Дамкелера равно 1. На рисунке 2 показано распределение концентрации загрязнения, которое визуализируется с использованием опции Volume Rendering. Визуально с увеличением расстояния от источника наблюдается эффект диффузии.

Сравнение массовой доли  $NO$  из двух труб (300 м и 330 м) на разных расстояниях (скорость ветра 3 м/с): 1000, 1500, 2500, 3000 и 10 000 м от начала координат. Как видно на графике, массовая доля для дымовой трубы высотой 330 м выше по сравнению с дымовой трубой 300 м. Отсюда можно сделать вывод, что высота дымовых труб существенно влияет на распределение загрязнений. Строительство более высоких дымоходов больше подходит для экологической безопасности.

Сравнение массовой доли продукта реакции  $NO_2$  из двух труб (300 м и 330 м) на разных расстояниях (скорость ветра – 3 м/с): 1000, 1500, 2500, 3000 и 10 000 м от начала координат. Рисунок 3 показывает, что загрязняющее вещество не сразу перемешивается. Перемешивание начинается от 500 м от источника.

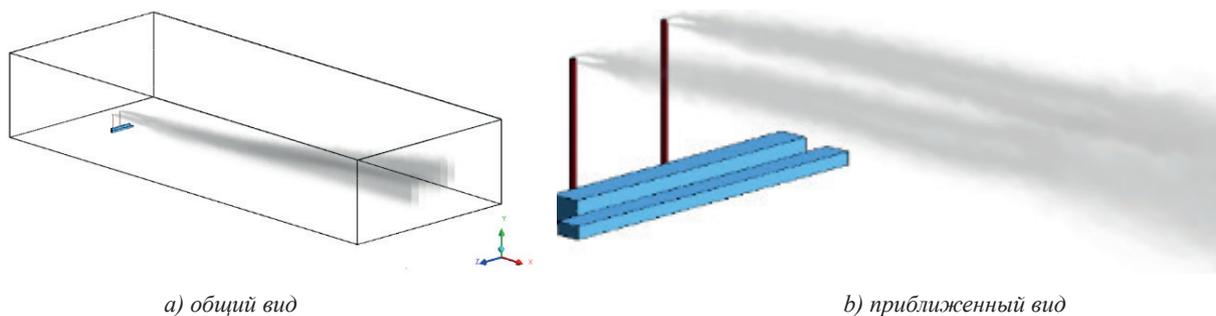


Рис. 26 – Визуализация распространения концентрации  $NO_2$  и  $NO$

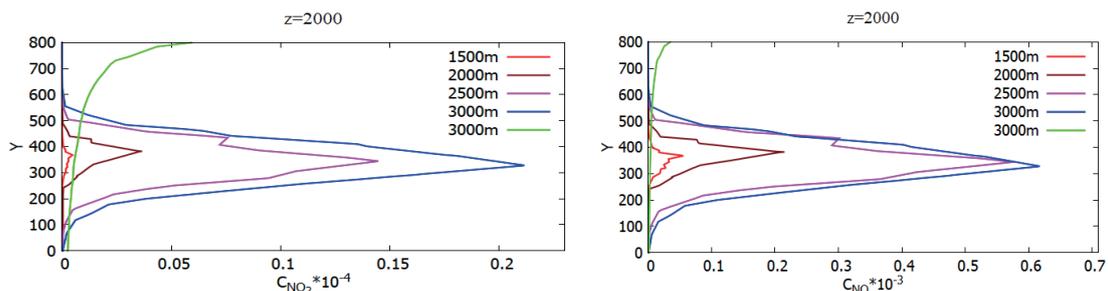


Рис. 39 – Сравнение профилей массовых долей  $NO$ ,  $NO_2$  в точках: 1500, 2000, 2500, 3000, 10000,  $z=2000$

### Заключение

В данной статье представлены результаты численного моделирования распространения загрязняющих веществ, образующихся при сгорании топлива на тепловой электростанции, и их химической реакции в атмосфере. Модель и алгоритм решения были проверены с помощью тестовой задачи. При обзоре темы были использованы реальные данные Экибастузской ГРЭС-1 и промоделирован процесс её работы. Примечательной особенностью данной теплоэлектростанции является то, что разница между дымоходами позволяет изучить влияние высоты источника на дисперсию загрязнения. Целью исследования было изучение динамики распространения выбросов и их соединение с кислородом в воздухе. На примере реальной теплоэлектростанции была смоделирована дисперсия  $NO$  и продукт  $NO_2$  при химической реакции с кислородом. Модель использует уравнение Навье-Стокса для моделирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере. Из численных результатов видно, что высота дымоходов существенно влияет на распределение газов. При анализе было обнаружено, что необходимо смоделировать процесс расположения источника распространения вредных приме-

сей тепловой электростанции в атмосферу таким образом, чтобы минимизировать загрязнение атмосферы. Строительство более высоких дымоходов для тепловой электростанции больше подходит для экологической безопасности.

Следует отметить, что в этой работе существуют некоторые ограничения. Основным ограничением является размер вычислительной сетки. Ресурсы компьютера ограничены в размере вычислительной сетки, в то время как мелкая сетка необходима для точного моделирования. Кроме того, дальнейшее увеличение компьютерных ресурсов будет сопровождаться требованиями ученых к увеличению разрешения сетки и включению дополнительных физических параметров, которые приведут к реальным проблемам. Вторым ограничением данной работы является сложность проведения анализа экспериментальных исследований по распространению химических соединений в атмосфере от деятельности тепловых электростанций (факторы окружающей среды, форма, размеры). Эти исследования полезны для тех, кто интересуется распределением химических соединений в атмосфере от деятельности тепловых электростанций.

## REFERENCES

1. H. Mayer, Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*, 1999, vol. 33(24-25), pp. 4029-4037.
2. R.E. Dunmore, J.R. Hopkins, R.T. Lidster, J.D. Lee, M.J. Evans, A.R. Rickard, A.C. Lewis, J.F. Hamilton, Diesel-related hydrocarbons can dominate gas phase reactive carbon in megacities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, vol. 15, pp. 9983-9996.
3. M.Z. Jacobson, *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge University Press, New York, 2005, vol. 306, pp. 111-144.
4. Z. Wu, & Liu, C.-H. Budget analysis for reactive plume transport over idealised urban areas. *Geoscience Letters*, 2018, vol. 19 (2018), pp. 5(1).
5. B. Fiorina, D. Veynante, S. Candel. Modeling combustion chemistry in Large-Eddy Simulation of turbulent flames. *Flow Turbulence Combust*, 2014, vol. 94 (2015), pp. 3-42.
6. W.J. Bloss, Atmospheric chemical processes of importance in cities. In: R.M. Harrison, R.E. Hester, (Eds.) *Air Quality in Urban Environments*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2009, vol. 28, pp. 42-64.
7. V. Muñoz, C. Casado, S. Suárez, B. Sánchez, & J. Marugán, Photocatalytic NO<sub>x</sub> removal: Rigorous kinetic modelling and ISO standard reactor simulation. *Catalysis Today*, 2018, vol 326, pp. 82-93.
8. Z. Li, H. Xu, W. Yang, M. Xu, & F. Zhao, Numerical investigation and thermodynamic analysis of syngas production through chemical looping gasification using biomass as fuel. *Fuel*, 2019, vol. 246.
9. B. Li, B. Shi, X. Zhao, K. Ma, D. Xie, D. Zhao, et al., Oxy-fuel combustion of methane in a swirl tubular flame burner under various oxygen contents: operation limits and combustion instability. *Exp Therm Fluid Sci*, 2018, vol. 90, pp. 115–124.
10. J.H. Ferziger and M. Peric. *Computational methods for fluid dynamics* 3rd ed. Springer, London, 2013, pp. 426.
11. T.J. Chung. *Computational fluid dynamics*, Cambridge: Cambridge University Press, 2002, pp.1012.
12. A. Issakhov. Modeling of synthetic turbulence generation in boundary layer by using Zonal RANS/LES method. *Int J Nonlinear Sci Num Simulat*, 2014, vol. 15, pp.115–120.
13. S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor & Francis, 1980.
14. R.M. Keimasi, M. Tacibi-Rahni, Numerical Simulation of Jets in a Crossflow Using Different Turbulence Model. *AIAA Journal*, 2001, vol. 39(12), pp. 2268-2277.
15. P. Ajersch, J. M. Zhou, S. Ketler, M. Salcudean, and I. S. Gartshore, Multiple Jets in a Cross flow: Detailed Measurements and Numerical Simulations. *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, ASME Paper 95-GT-9, Houston, TX, 1995, pp. 1–16.

**Information about authors:**

1. Alibek Issakhov – PhD, Head of the Department of Mathematical and Computer Modeling, Al-Farabi Kazakh National University

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1937-8615>

Email: [Alibek.issakhov@gmail.com](mailto:Alibek.issakhov@gmail.com)

2. Aidana Alimbek – Master of technical sciences, tutor of the Scientific and Educational Center of Mathematics and Cybernetics, Kazakh-British Technical University, st. Tole bi 59

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-784X>

Email: [a.alimbek@kbtu.kz](mailto:a.alimbek@kbtu.kz)

INFINITE FAMILIES OF TOTAL FUNCTIONS WITH  
PRINCIPAL NUMBERINGS

ISSAKHOV A.A., RAKYMZHANKYZY F., OSTEMIROVA U.

*Kazakh-British technical university, 050000, Almaty, Kazakhstan*

**Abstract.** It was known that any non-single-element (in particular, any infinite) family of total functions with an oracle  $A$ , such that  $\emptyset' \leq_T A$ , does not have  $A$ -computable principal numbering; later it was proved that any finite family of total functions with a hyperimmune-free oracle  $A$  always has an  $A$ -computable principal numbering. The unresolved question was whether there exists an infinite family of total functions with a hyperimmune-free oracle  $A$  that has an  $A$ -computable principal numbering. The paper gives a positive answer to this question: it is proved that there exists an infinite  $A$ -computable family  $F$  of total functions, where the Turing degree of the set  $A$  is hyperimmune-free, such that  $F$  has an  $A$ -computable principal numbering.

**Key words:**  $A$ -computable numbering, hyperimmune oracle, hyperimmune-free oracle, principal numbering.

БАСТЫ НӨМІРЛЕУЛЕРІ БАР БАРЛЫҚ ЖЕРДЕ АНЫҚТАЛҒАН  
ФУНКЦИЯЛАРДАН ТҰРАТЫН ШЕКСІЗ ҮЙІРЛЕР

ИСАХОВ А.А., РАХЫМЖАНҚЫЗЫ Ф., ӨСТЕМИРОВА У.

*Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан*

**Аңдатпа.** Кез келген бір-элементті емес (жеке жағдайда, кез келген шексіз) барлық жерде анықталған функциялардан тұратын  $A$  оракулымен есептелетін үйірлердің  $A$ -есептелімді бас нөмірлеуі болмайтыны белгілі болған және бұл тұжырым  $\emptyset' \leq_T A$  үшін дұрыс; кейінірек, кез келген барлық жерде анықталған функциялардан тұратын гипериммунды-бос  $A$  оракулымен есептелетін \*This work was supported by the Science Committee of the Republic of Kazakhstan (Grant AP08856493) ақырлы үйірлердің әрдайым  $A$ -есептелімді бас нөмірлеуі болатыны дәлелденген.  $A$ -есептелімді бас нөмірлеуі бар барлық жерде анықталған функциялардан тұратын гипериммунды-бос  $A$  оракулымен есептелетін ақырсыз үйір табылатыны шешілмеген мәселе болып қалған. Осы жұмыста бұл мәселе оң шешімін тапты:  $A$ -есептелімді бас нөмірлеуі бар барлық жерде анықталған функциялардан тұратын гипериммунды-бос  $A$  оракулымен есептелетін ақырсыз үйір табылатыны дәлелденген.

**Түйінді сөздер:**  $A$ -есептелімді нөмірлеу, гипериммунды оракул, гипериммунды-бос оракул, бас нөмірлеу.

БЕСКОНЕЧНЫЕ СЕМЕЙСТВА ВСЮДУ ОПРЕДЕЛЕННЫХ  
ФУНКЦИЙ С ГЛАВНЫМИ НУМЕРАЦИЯМИ

ИСАХОВ А.А., РАХЫМЖАНҚЫЗЫ Ф., ӨСТЕМИРОВА У.

*Казахстанско-Британский технический университет, 050000, Алматы, Казахстан*

**Аннотация.** Ранее было известно, что любое не одноэлементное (в частности, любое бесконечное) семейство всюду определенных функций с оракулом  $A$ , такое что  $\emptyset' \leq_T A$ , не имеет  $A$ -вычислимую главную нумерацию, позже было доказано, что любое конечное семейство всюду определенных функций с гипериммунно-свободным оракулом  $A$  всегда обладает  $A$ -вычислимой главной нумерацией. Оставался нерешенным вопрос о том, существует ли бесконечное семейство всюду определенных функций с

гипериммунно-свободным оракулом  $A$ , которое имеет  $A$ -вычислимую главную нумерацию. В работе приводится положительный ответ на указанный вопрос: доказано, что существует бесконечное  $A$ -вычислимое семейство  $F$  всюду определенных функций, где тьюрингова степень множества  $A$  гипериммунно-свободна, такое, что  $F$  имеет  $A$ -вычислимую главную нумерацию.

**Ключевые слова:**  $A$ -вычислимая нумерация, гипериммунный оракул, гипериммунно-свободный оракул, главная нумерация.

**Introduction**

**$A$ -computable principal numberings**

All basic definitions related to computable numberings can be found in [1].

If a family  $F$  of total functions is  $A$ -computable for arbitrary set  $A$ , then a numbering  $\alpha$  of the family  $F$  is called  $A$ -computable while  $\alpha(n)(x)$  is  $A$ -computable binary function, [2]. If degree  $\alpha$  contains a hyperimmune set, then  $\alpha$  is hyperimmune. Otherwise,  $\alpha$  is hyperimmune-free.

It is known that if an  $A$ -computable family  $F$  of total functions contains at least two elements, where  $A$  is a hyperimmune set (for  $A \geq \emptyset'$  see [3]), then  $F$  has no  $A$ -computable principal numbering, [4]. It was also proved that if finite  $A$ -computable family  $F$  of total functions, where Turing degree of the set  $A$  is hyperimmune-free, then  $F$  has an  $A$ -computable principal numbering, [5].

Now we introduce alternative proofs of some theorems related to the main theorem.

**Main part**

**Theorem (Issakhov, [3]).** If an  $A$ -computable family  $F$  contains at least two functions, where  $\emptyset' \leq_T A$ , then  $F$  has no  $A$ -computable principal numbering.

*Proof.* Let  $\alpha$  be an  $A$ -computable numbering of the family  $F$ .  $f$  and  $g$  are two different functions from  $F$ . Therefore there exists  $a \in \omega$  such that

$$f(a) \neq g(a).$$

Construct a numbering  $\beta$  such that for any  $e \in \omega$ :

$$\beta(e) \neq \alpha\varphi_e(e).$$

Let

$$K = \{a_0 < a_1 < a_2 < \dots\},$$

$$\bar{K} = \{b_0 < b_1 < b_2 < \dots\}$$

be halting set and its complement, respectively, which are  $A$ -computable sets. Let's define

$$\beta(b_i) = \alpha(i)$$

for any  $i \in \omega$ , which guarantee that  $\beta$  is an  $A$ -computable numbering of the family  $F$ . But

$$\beta(a_i) = \begin{cases} f, & \text{if } \alpha\varphi_{a_i}(a_i)(a) = g(a) \\ g, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Then  $\beta$  is still  $A$ -computable numbering of the family  $F$ , and

$$\beta(a_i)(a) \neq \alpha\varphi_{a_i}(a_i)(a).$$

Therefore, for any  $\alpha$  there exists  $\beta$  such that  $\beta \not\leq \alpha$ , which means  $\alpha$  can not be a principal numbering of the family  $F$ .

Theorem is proved.

Note that every finite family of computably enumerable (c.e.) sets has a principal computable numbering.

**Theorem (Badaev, Goncharov, [2]).** For every set  $A$ , where  $\emptyset' \leq_T A$ , a finite family  $S$  of  $A$ -c.e. sets has an  $A$ -computable principal numbering if and only if  $S$  contains the least set under inclusion.

**Theorem (Badaev, Goncharov, [2]).** For every set  $A$ , there is an infinite  $A$ -computable family  $S$  of sets with pairwise disjoint elements such that  $S$  has an  $A$ -computable principal numbering.

Compare with the results in [6].

An infinite set  $A$  is hyperimmune if and only if no recursive function majorizes  $A$ , [7].

**Theorem (Miller, Martin), [8].**

- (a) If  $\alpha$  is hyperimmune and  $\alpha < \beta$  then  $\beta$  is hyperimmune.
- (b)  $\alpha$  is hyperimmune iff some function of

degree  $\leq \alpha$  is majorized by no recursive function.

(c) If  $(\exists a)[a < b < a']$ , then  $b$  is hyperimmune.

(d) Every nonzero degree comparable with  $0'$  is hyperimmune.

**Theorem (Issakhov, [5]).** Let  $A$  be a hyperimmune set. If  $A$ -computable family  $F$  of total functions contains at least two elements, then  $F$  has no principal  $A$ -computable numbering.

*Proof.* Let  $\alpha$  be an  $A$ -computable numbering of the family  $F$ , and  $f$  and  $g$  be two different functions from  $F$ . Then there exists a number  $a$  such that

$$f(a) \neq g(a).$$

Construct  $\beta$  such that  $\beta \not\leq \alpha$ , i.e. for any  $e \in \omega$ :  $\beta \neq \alpha\varphi_e$ . Let

$$\beta(\langle 0, e, x \rangle) = \begin{cases} g, & \text{if } \alpha\varphi_{e, h(x)}(\langle 0, e, x \rangle)(a) = f(a) \\ f, & \text{otherwise} \end{cases}$$

where  $h$  is a non-majorized  $A$ -computable function. And

$$\beta(\langle n, e, x \rangle) = \alpha(\langle e, x \rangle)$$

for all  $n > 0$ , i.e.  $\beta$  is the numbering of the family  $F$ .

If  $\varphi_e$  is not total, then

$$\beta(x) \neq \alpha\varphi_e(x)$$

for some  $x \in \omega$ .

If  $\varphi_e$  is total, then

$$\hat{h}(x) = \min\{s : \varphi_{e, s}(\langle 0, e, x \rangle) \downarrow\}$$

$$A_0 = \{a_{00}, a_{01}, \dots, a_{0m_0} \mid f_0(a_{00}) \neq f_1(a_{00}), f_0(a_{01}) \neq f_2(a_{01}), \dots, f_0(a_{0m_0}) \neq f_n(a_{0m_0})\}$$

$$A_1 = \{a_{10}, a_{11}, \dots, a_{1m_1} \mid f_1(a_{10}) \neq f_0(a_{10}), f_1(a_{11}) \neq f_2(a_{11}), \dots, f_1(a_{1m_1}) \neq f_n(a_{1m_1})\}$$

.....

$$A_n = \{a_{n0}, a_{n1}, \dots, a_{nm_n} \mid f_n(a_{n0}) \neq f_0(a_{n0}), f_n(a_{n1}) \neq f_1(a_{n1}), \dots, f_n(a_{nm_n}) \neq f_{n-1}(a_{nm_n})\}$$

where  $m_0, m_1, \dots, m_n \leq n$ .

Denote by  $\Phi_e^A(x, y)$  all  $A$ -computable binary

is computable function.

Since  $h$  is a non-majorized  $A$ -computable function, then there exists a number  $b \in \omega$  such that  $\hat{h}(b) < h(b)$ . Therefore

$$\varphi_{e, h(b)}(\langle 0, e, b \rangle) \downarrow,$$

and

$$\beta(\langle 0, e, b \rangle) \neq \alpha\varphi_e(\langle 0, e, b \rangle).$$

Theorem is proved.

**Theorem (Issakhov, [5]).** If Turing degree of a set  $A$  is hyperimmune-free then every  $A$ -computable finite family of total functions has an  $A$ -computable principal numbering.

*Proof.* Note that a degree  $\alpha$  is hyperimmune if and only if some function of degree  $\leq \alpha$  is majorized by no recursive function. Therefore a degree  $\alpha$  is hyperimmune-free if and only if for any function  $f$  of degree  $\leq \alpha$  there exists computable function  $g$  such that  $f(n) \leq g(n)$  for all  $n \in \omega$ .

Let  $\alpha$  be an  $A$ -computable numbering of the finite family

$$F = \{f_0, f_1, \dots, f_n\}$$

of total functions. Define distinguishing sets  $A_0, A_1, \dots, A_n$  of the functions  $f_0, f_1, \dots, f_n$  which satisfy the next two conditions:

(1)  $A_i = \{a_{i0}, a_{i1}, \dots, a_{im}\}$  for some  $m \leq n$ ,

(2) for any  $j \leq n$  there exists  $k \leq m$  such

that

$$\text{if } j \neq i \text{ then } f_i(a_{ik}) \neq f_j(a_{ik}).$$

It means

functions by  $e \in \omega$ . Then there exists  $e$  such that

$$\Phi_e^A(x)(y) = \Phi_e^A(x, y) \equiv \alpha(x)(y),$$

and the same for any numbering. Let

$$\beta(\langle e, x, s \rangle)(y) = \begin{cases} f_i(y), & \text{if } \exists i \leq n \left( f_i(a_{ik}) = \Phi_{e,s}^A(x)(a_{ik}) \right) \text{ for all } k \leq |A_i| \\ f_0(y), & \text{otherwise} \end{cases}$$

From construction it is easy to see that  $\beta$  is  $A$ -computable numbering of the family  $F$ . We show that  $\beta$  is  $A$ -computable principal numbering of  $F$ .

Let  $\gamma$  be an  $A$ -computable numbering of the family  $F$ . Then there exists  $e_1 \in \omega$  such that

$$\gamma(x) = \Phi_{e_1}^A(x)$$

for any  $x \in \omega$ . Let

$$g(x) = \min \left\{ s : \exists i \leq n \left( f_i(a_{ik}) = \Phi_{e_1,s}^A(x)(a_{ik}) \right) \text{ for all } k \leq |A_i| \right\}.$$

$g(x)$  is an  $A$ -computable total function, where Turing degree of the set  $A$  is hyperimmune-free. Therefore, there exists a computable function  $f$  such that  $g(x) \leq f(x)$  for any  $x \in \omega$ . Then

$$\begin{aligned} \beta(\langle e_1, x, f(x) \rangle)(y) &= f_i(y) = \\ &= f_i(y) = \Phi_{e_1}^A(x)(y) = \gamma(x)(y) \end{aligned}$$

for all  $y \in \omega$ , i.e.

$$\beta(\langle e_1, x, f(x) \rangle) = \gamma(x)$$

which means  $\gamma \leq \beta$ .

Theorem is proved.

Note that the Rogers semilattice of the family from previous theorem is not trivial, since

**Theorem (Issakhov, [5]).** Let  $\emptyset <_T A$ . Then any  $A$ -computable non-trivial finite family of total functions has at least two non-equivalent  $A$ -computable numberings.

*Proof.* Let

$$F = \{f_0, f_1, \dots, f_n\},$$

where  $n > 0$ ,

$$\alpha(i) = \begin{cases} f_i, & \text{if } i \leq n \\ f_0, & \text{if } i > n \end{cases}$$

and

$$\beta(i) = \begin{cases} f_i, & \text{if } i \leq n \\ f_0, & \text{if } i > n \text{ and } i \in A \\ f_1, & \text{if } i > n \text{ and } i \notin A \end{cases}$$

We show that  $\alpha \not\equiv \beta$ . Assume  $\alpha \equiv \beta$ , then there exists a computable function  $g$  such that  $\beta(x) = \alpha(g(x))$ . Note that

$$x \in A \setminus [0; n] \Leftrightarrow (x > n) \text{ and } (g(x) = 0 \text{ or } g(x) > n)$$

Since the right part is computable then  $A \setminus [0; n]$  is also computable. Therefore  $A$  is computable too, contradiction.

Theorem is proved.

### Main result

**Theorem.** There exists an infinite  $A$ -computable family  $F$  of total functions, where Turing degree of the set  $A$  is hyperimmune-free, such that  $F$  has an  $A$ -computable principal numbering.

*Proof.* Let's remind that  $\mathbf{a}$  is hyperimmune-free degree if and only if for any  $f \leq_T \mathbf{a}$  there exists computable function  $g$  such that

$$f(n) \leq g(n)$$

for all  $n \in \omega$ .

Assume that the infinite  $A$ -computable family  $F$  of total functions consists of only constant functions  $f_0, f_1, \dots, f_n, \dots$  where

$$f_i(x) = i$$

for all  $x \in \omega$ . Denote by  $\Phi_e^A(x, y)$  all  $A$ -computable binary functions by  $e \in \omega$ . Let  $\alpha$  be an arbitrary  $A$ -computable numbering of the family  $F$ . Then there exists a number  $e$  such that

$$\alpha(x)(y) = \Phi_e^A(x, y).$$

Let

$$\beta(\langle e, x, s \rangle)(y) = \begin{cases} f_i(y), & \text{if } \exists i \left( f_i(k) = \right. \\ \left. f_0(y), \right. \end{cases}$$

$$= \Phi_{e,s}^A(x)(k) \text{ for all } k \leq s \\ \text{otherwise.}$$

From construction of  $\beta$  it is easy to see that  $\beta$  is an  $A$ -computable numbering of the family  $F$ . Let's show that  $\beta$  is a principal numbering of the family  $F$ .

Take any numbering  $\gamma$  of the family  $F$  and show that  $\gamma \leq \beta$ . Since  $\gamma$  is a numbering of the family  $F$ , there exists a number  $e_1 \in \omega$  such that

$$\gamma(x) = \Phi_{e_1}^A(x)$$

for any  $x \in \omega$ .

$$g(x) = \min \{s: \exists i (f_i(k) = \Phi_{e_1,s}^A(x)(k)) \text{ for all } k \leq s\}$$

$g$  is an  $A$ -computable total function, where Turing degree of the set  $A$  is hyperimmune-free. Therefore, there exists computable function  $f$  such that  $g(x) \leq f(x)$  for any  $x \in \omega$ . It means that

$$\beta((e_1, x, f(x)))(y) = f_i(y) = \Phi_{e_1,s}^A(x)(y) = \gamma(x)(y)$$

for all  $y \in \omega$ , i.e.

$$\gamma(x) = \beta((e_1, x, f(x))).$$

Therefore  $\gamma \leq \beta$ .

Theorem is proved.

### Conclusion

Note that, [4, 9], if an  $A$ -computable family  $F$  of total functions contains at least two elements, where  $A$  is a hyperimmune set, then  $F$  has no  $A$ -computable principal numbering; but if Turing degree of the oracle set  $A$  is hyperimmune free then any finite  $A$ -computable family  $F$  of total functions has an  $A$ -computable principal numbering, and also now there exists an infinite  $A$ -computable family  $F$  of total functions such that  $F$  has an  $A$ -computable principal numbering.

**Question.** Is there an infinite  $A$ -computable family of total functions, where Turing degree of the set  $A$  is hyperimmune free, with no  $A$ -computable principal numbering?

### REFERENCES

1. Yu.L. Ershov. Theory of numberings \ \ Handbook of Computability Theory. – North-Holland; Amsterdam: Stud. Log. Found. Math., 1999, Vol. 140, pp. 473-503.
2. S.A. Badaev and S.S. Goncharov, Generalized computable universal numberings, Algebra and Logic, vol. 53 (2014), no. 5, pp. 355-364.
3. A.A. Issakhov, Ideals without minimal elements in Rogers semilattices, Algebra and Logic, vol. 54 (2015), no. 3, pp. 197-203.
4. A.A. Issakhov,  $A$ -computable numberings of the families of total functions, The Bulletin of Symbolic Logic, vol. 22 (2016), no. 3, p. 402.
5. Assylbek Issakhov, Hyperimmunity and  $A$ -computable universal numberings, AIP Conference Proceedings, vol. 1759, 020106 (2016); doi: 10.1063/1.4959720.
6. M.Kh. Faizrakhmanov, Universal generalized computable numberings and hyperimmunity, Algebra and Logic, vol. 56 (2017), no. 4, pp. 337-347.
7. Soare R.I., Recursively enumerable sets and degrees. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1987. – 437 p.
8. Miller W., Martin D.A., The degree of hyperimmune sets \ \ Z. Math. Logik Grundlag. Math., 1968, Vol. 14, pp. 159-166.
9. Issakhov A.A., Rakymzhankyzy F., Hyperimmunity and  $A$ -computable numberings \ \ The Bulletin of Symbolic Logic, 2018, Vol. 24, No. 2, pp. 248-249.

**Information about authors:**

1. Assylbek A. Issakhov – PhD Doctor, Head and Professor of the Scientific and Educational Center of Mathematics and Cybernetics KBTU, Kazakh-British Technical University, st. Tole bi 59  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-7988> Email: [a.isakhov@kbtu.kz](mailto:a.isakhov@kbtu.kz)
2. Fariza Rakymzhankyzy – Master of Science, PhD student, Scientific and Educational Center for Mathematics and Cybernetics, Kazakh-British Technical University, st. Tole bi 59  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6517-5560>  
Email: [fariza.rakymzhankyzy@gmail.com](mailto:fariza.rakymzhankyzy@gmail.com)
3. Uldana B. Ostemirova – PhD student, tutor of the Scientific and Educational Center of Mathematics and Cybernetics, Kazakh-British Technical University, st. Tole bi 59  
Email: [u.ostemirova@kbtu.kz](mailto:u.ostemirova@kbtu.kz)

УДК 533.9.01; 519.63; 519.684  
 МРНТИ 50.07.05; 27.35.14

DOI 10.55452/1998-6688-2021-18-2-59-66

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ НА ВЫСОКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМАХ

ИСАХОВ А.А.<sup>1,2</sup>, АБЫЛКАСЫМОВА А.Б.<sup>2</sup>, МАНСУРОВА М.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, 050000, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахстанско-Британский технический университет, 050000, Алматы, Казахстан

**Аннотация.** Высокая параллельная эффективность для различных крупномасштабных задач требует, чтобы вычислительная нагрузка была равномерно распределена между всеми вычислительными процессорами. В данном исследовании представлена схема динамического балансирования нагрузки, которая позволяет повысить эффективность сложных связанных симуляций с нетривиальными разложениями в области. Кроме того, результаты эксперимента с сильным масштабированием показывают, что выгода от выравнивания нагрузки пропорциональна степени параллелизма.

**Ключевые слова:** динамическое выравнивание нагрузки, параллельная эффективность, теплообмен в носовой полости, схема расщепления по физическим параметрам, метод конечных объемов.

## КЛАСТЕРЛІК ЖОҒАРЫ ПАРАЛЛЕЛЬДІ ЕСЕПТЕУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ЖҮКТЕМЕНІ ТЕҢДЕСТІРУ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ

ИСАХОВ А.А.<sup>1,2</sup>, АБЫЛКАСЫМОВА А.Б.<sup>2</sup>, МАНСУРОВА М.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан

**Аңдатпа.** Әртүрлі масштабты тапсырмалар үшін жоғары параллельді тиімділік есептеу жүктемесін барлық есептеу процессорлары арасында біркелкі бөлуді талап етеді. Бұл зерттеу аймақтағы тривиалды емес ыдырауымен күрделі байланысты модельдеудің тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін динамикалық жүктемені теңдестіру схемасын ұсынады. Сонымен қатар жоғары масштабтау экспериментінің нәтижелері жүктемені теңдестірудің пайдасы параллелизм деңгейіне пропорционалды екенін көрсетеді.

**Түйінді сөздер:** жүктемені динамикалық теңдестіру, параллельді тиімділік, мұрын қуысындағы жылу алмасу, физикалық параметрлер бойынша ыдырату схемасы, ақырлы көлем әдісі.

## APPLICATION OF THE LOAD BALANCING METHOD ON HIGH PARALLEL COMPUTING CLUSTER SYSTEMS

ISSAKHOV A.A.<sup>1,2</sup>, ABYLKASYMOVA A.B.<sup>2</sup>, MANSUROVA M.Ye.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazakh National university named after al-Farabi, 050000, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kazakh-British technical university, 050000, Almaty, Kazakhstan

**Abstract.** High parallel efficiency for various large-scale tasks requires that the computational load is evenly distributed among all computational processors. This study presents a dynamic load balancing scheme that improves the performance of complex coupled simulations with non-trivial domain expansions. In addition, the high scaling experiment results show that the benefit of load balancing is proportional to the degree of parallelism.

**Keywords:** dynamic load balancing, parallel efficiency, air flow in the human respiratory system, alveolar state, heat exchange in the nasal cavity, projection method, finite volume method.

## Введение

Носовая полость человека выступает в качестве важного компонента дыхательной системы с множеством жизненно важных функций, включая нагревание, фильтрацию, увлажнение воздушного потока и обоняние. Эти функции основаны на явлениях переноса, которые зависят от характера воздушного потока в носовой структуре. Обычная скорость дыхания в носовой полости рассматривается как ламинарный поток, который ускоряется в определенных местах носа и превращается в переходный поток, постепенно превращаясь в турбулентный поток из-за уменьшения площади поперечного сечения [1]. В работе [2] провели измерения с помощью лазерной анемометрии на модели человеческого носа и обнаружили, что поле потока в основном ламинарное, а профили скорости почти параболические во всех поперечных сечениях. С развитием высокопроизводительных вычислений в последние годы многие исследователи рассматривали моделирование с помощью вычислительной гидродинамики (CFD) в качестве альтернативного подхода для изучения воздушного потока в дыхательных системах человека. В работах [3-6] для моделирования воздушного потока в носовой полости используют ламинарную модель при относительно низких скоростях. Так, для получения более точного численного результата для моделирования воздушного потока в носовой полости используются высокопроизводительные вычисления. Однако основным недостатком использования решателей является необходимость обмена членами источника через дисковый ввод-вывод. Помимо огромных требований к дисковому пространству для крупномасштабных задач, общая параллельная масштабируемость ограничена доступной пропускной способностью ввода/вывода. Таким образом, в работе был разработан новый связанный метод. Это позволяет одновременно выполнять оба метода с обменом данными в памяти. Кроме того, используя разделение вычислительной области в комбинации с динамической балансировкой нагрузки (DLB) является возможной. Таким образом, данный

метод сочетает в себе преимущества подходов прямого и гибридного решения, то есть минимизирует время для ввода-вывода и использует различные длины шкалы. Разделение вычислительной сетки широко используется для распараллеливания и балансировки нагрузки в приложениях для научных вычислений [7]. Данное разделение обеспечивает линейаризацию объектов, расположенных в многомерном пространстве, сохраняя пространственную локальность. Таким образом, определение разложения домена сводится к решению проблемы одномерного разбиения, которая известна как проблема разбиения цепочек на цепочки (ССР). Проблема ССР широко изучалась в литературе, давая точные решения [8], параллельные эвристики [9], масштабируемые иерархические алгоритмы [10], а также расширение для гетерогенных систем [11]. Все эти методы предполагают, что имеется достаточно точная информация о распределении рабочей нагрузки. Это может быть достигнуто, например, с помощью инструментария кода для измерения времени вычислений на объектной основе [12]. Однако в случае, если такой подход неосуществим, требуется альтернатива для оценки весов для различных типов объектов с разными вычислительными затратами. Это предполагает, что каждый объект определенного типа демонстрирует одинаковую постоянную нагрузку. Тем не менее для сложных приложений это часто приводит к неоптимальной декомпозиции домена со сбалансированной нагрузкой, поскольку локальные изменения рабочей нагрузки не фиксируются. Следовательно, требуется метод DLB для секционирования на основе разбиения вычислительной области, который непосредственно нацелен на дисбаланс нагрузки. В данной работе представлена схема динамического выравнивания нагрузки для связанных методов, которая позволяет повысить эффективность комплексного моделирования с нетривиальными разложениями доменов.

## Распараллеливания с помощью динамической балансировки нагрузки

Для моделирования потока воздуха в носовой полости, основные уравнения для со-

хранения массы, импульса, температуры и относительной влажности. Для численного решения данной системы уравнений используется схема расщепления по физическим параметрам [13]. Уравнения дискретизируются с помощью метода конечных объемов [13]. Конечная цель динамической балансировки нагрузки - максимизировать общую производительность параллельных вычислений путем перераспределения рабочей нагрузки между процессами так, чтобы вся доступная вычислительная мощность использовалась на полную мощность [7]. Балансировка нагрузки в высокопараллельных приложениях является ключом для эффективного использования ресурсов [14], поскольку даже незначительные дисбалансы могут серьезно повлиять на производительность и масштабируемость вычислений. Численное моделирование обычно включает частую связь между подобластями MPI, так что усугубление дисбаланса будет происходить на каждой итерации или стадии временного шага из-за синхронизации [15]. Кроме того, потеря производительности чувствительна к конкретной модели дисбаланса. Один перегруженный процесс значительно снизит общую производительность. Причина этого заключается в том, что все остальные процессы ждут и бездействуют, пока не будет продолжена связь между соседними областями. С другой стороны, некоторые недостаточно загруженные процессы будут иметь незначительное влияние на общую производительность. Наконец, дисбалансы можно классифицировать как динамические или статические [15]. Динамические дисбалансы возникают, если распределение рабочей нагрузки изменяется в зависимости от времени, что происходит, например, при использовании адаптивных сеток решения. Постоянное распределение рабочей нагрузки приведет к статическому дисбалансу.

Дисбаланс нагрузки и результирующее влияние на производительность могут быть количественно определены с помощью различных показателей. Здесь процент дисбаланса [44], который выражает серьезность дисбаланса, и определяется в таком виде

$$I_{\%} = \frac{t_{\max} - t_{\text{avg}}}{t_{\max}} \frac{N}{N - 1}.$$

Величины  $t_{\max}$  и  $t_{\text{avg}}$  представляют максимальное и среднее время, необходимое для обработки данного фрагмента программного кода, а  $N$  - количество параллельных процессов. Значение  $I_{\%}=0\%$  соответствует идеально сбалансированному распределению нагрузки, а  $I_{\%}=100\%$  связано с разделом кода, выполняемым только для одного процесса. Таким образом, данная метрика показывает количество потраченных впустую ресурсов. Это предполагает, что все, кроме самого медленного процесса, простаивают в конце соответствующего раздела кода, что может быть связано с завершением одного временного шага или этапа схемы интегрирования по времени в численном моделировании. Потенциальная экономия времени работы выражается через время дисбаланса  $I_T = t_{\max} - t_{\text{avg}}$  в предположении, что достигается идеальный баланс нагрузки [16]. Кроме того, влияние времени распределения оценивается как  $I_T = N I_p$ , что является верхней границей общего количества потраченных ресурсов [15].

Ключом к разделению и балансировке нагрузки для связанных задач является оценка вычислительных затрат для различных объектов при моделировании [12]. Стандартный подход для сред с единственным методом направлен на равномерное распределение объектов по всем параллельным поддоменам, предполагая однородную вычислительную среду и то, что каждый объект имеет одинаковые постоянные вычислительные затраты. Однако это создает трудности, если существует несколько типов объектов с различными вычислительными затратами. Эта проблема может быть уменьшена путем использования заранее определенных вычислительных весов для каждого типа объекта, который для рассматриваемого случая включает в себя вычислительные ячейки. Однако для сложных приложений это часто приводит к неоптимальной декомпозиции с балансировкой нагрузки из-за неточных вычислительных весов, которые не учитывают вычислительные нагрузки всех

задействованных алгоритмических элементов или неоднородного вычислительного оборудования. Инструментальные средства кода для измерения фактического времени вычислений каждого объекта представляют собой возможные контрмеры [17]. Однако этот подход часто оказывается невозможным для научных приложений из-за значительных усилий по внедрению и дополнительных накладных расходов, вызванных различными инструментами. Таким образом, для оценки вычислительных весов требуется минимально навязчивый и надежный метод, который, в свою очередь, может использоваться для балансировки нагрузки.

Алгоритм DLB, предложенный в этом исследовании, оценивает вычислительные веса на основе измерений вычислительного времени в каждом параллельном поддомене. Кроме того, текущее распределение объектов включены различные методы среди всех поддоменов. Эти типы объектов, которые можно рассматривать как различные типы нагрузки, приводят к изменению состава нагрузки. Во время моделирования общее время вычислений всех методов измеряется локально для каждого временного шага. В каждом поддомене  $i$  среднее значение  $r_i$  определяется как усеченное среднее значение на 25% для фильтрации внешних программных воздействий [15]. С глобальным средним временем вычислений среди всех  $N$  параллельных процессов

$$\text{задаются как } \bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} r_i \quad (1)$$

локальная вычислительная нагрузка  $l_i$  определяется в таком виде

Впоследствии вычислительные веса  $c$  для различных типов нагрузки могут быть оценены путем решения задачи  $Ac = l$  с помощью метода наименьших квадратов, причем правая часть определяется вектором нагрузки  $l$ , а левая матрица  $A$  представляет текущее распределение рабочей нагрузки среди всех поддоменов. Это предполагает, что в среднем нагрузка может быть выражена как линейная комбинация отдельных вкладов рабо-

чей нагрузки. Линейная задача наименьших квадратов с единственным решением минимальной нормы может быть записана как

$$\|Ac - l\|_2 = \min_v \|Av - l\|_2 \text{ и } \|v\|_2 \quad (3)$$

В настоящей работе для решения проблемы методом наименьших квадратов используется процедура DGELSD в LAPACK [17], приведенной в формуле (3). Пример для этой процедуры с двумя типами нагрузки, распределенными среди  $N=4$  параллельных поддоменов, приведен в формуле (4). Решение переопределенной системы линейных уравнений методом наименьших квадратов дает расчетное весовое соотношение 2.61 между двумя типами нагрузки. Таким образом, среднее время вычислений для второго типа объекта оценивается в 2.6 раза выше, чем у первого.

$$N \begin{bmatrix} 10 & 7 \\ 13 & 4 \\ 12 & 2 \\ 5 & 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.2 \\ 0.9 \\ 0.8 \\ 1.1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow Ac = l$$

→  
least squares solution

$$c = \begin{bmatrix} 0.0420 \\ 0.1097 \end{bmatrix} \frac{c_1}{c_0} = 2.61 \quad (4)$$

В общем, вычисление с помощью декомпозиции области на основе моделирования сводится к решению возникающей проблемы ССР. Простое расширение для динамической балансировки нагрузки дается путем оценки вычислительных весов для различных типов нагрузки во время моделирования, чтобы определить новые рабочие нагрузки в качестве входных данных для проблемы разделения с помощью 1D декомпозиции области. Однако, поскольку локальные изменения рабочей нагрузки не фиксируются, разделение может быть неоптимальным с точки зрения производительности, поскольку любой выбранный алгоритм ССР стремится к оптимальному качеству раздела. Поэтому для более строгого устранения дисбаланса нагрузки предлагается другая процедура для определения новых смещений домена для разделения на основе моделирования. Во-первых, начальное разбиение улучшается за счет использования вышеупомянутого способа для получения достаточно хорошей начальной точки для последующих этапов.

На следующих этапах перераспределения отдельные смещения области уточняются итеративно на основе измеренного дисбаланса нагрузки и вычисленных весов вычислений. В качестве отправной точки, кумулятивные дисбалансы нагрузки, представленные в виде

$$s_j = \sum_{i=0}^{j-1} l_i - 1, \forall j \in \{1, \dots, N\} \text{ с } s_0 = 0 \quad (5)$$

Каждое значение количественно определяет для соответствующего смещения домена  $o_j$  общий дисбаланс нагрузки области слева и справа от позиции разделения. Таким образом, оптимальное локальное положение требует смещения  $o_j$  во время проведения моделирования, чтобы минимизировать совокупный дисбаланс. Общее предположение этого подхода состоит в том, что путем оптимизации каждого смещения в отдельности может быть получен глобальный баланс нагрузки. Эта процедура может быть понята как инкрементный, диффузионный метод DLB [17], основанный на разделении CFD, который может лучше подходить для крупномасштабного моделирования [18]. С вычислительной нагрузкой  $l_i$  каждого параллельного поддомена, совокупные дисбалансы  $s_j$  вычисляются в соответствии с формулой (5). Таким образом, расхождение нагрузки между всеми процессами слева и справа от каждой позиции разделения определяется количественно. Это подразумевает, что, учитывая значение  $s_2=0.45$  в примере, вычислительная нагрузка первых двух процессов значительно выше, чем у двух оставшихся. Поэтому, сдвигая смещение влево, рабочая нагрузка перемещается из перегруженных в недостаточно загруженные процессы. Соответственно, глобальные дисбалансы нагрузки могут быть уменьшены путем индивидуального сдвига каждого смещения домена в направлении, заданном

$$d_j = -\text{sign}(s_j) \quad (6)$$

Распределение нагрузки  $w_k$  ячейки раздела  $k$  в домене  $i$  вычисляется как  $\tilde{w}_k = l_i \bar{w}_k$

с,  $\bar{w}_k = \frac{w_k}{W_i}$ , что можно интерпретировать как

распределение нагрузки  $l_i$  на ячейки локального раздела. Путем уравнивания совокупного дисбаланса  $s_j$  с пересекаемыми долями нагрузки на ячейки раздела

$$s_j^k = s_j^{k-1} + d_j \cdot f_{\text{penalty}} \cdot \tilde{w}_m(k) \quad \text{для } k \geq 1$$

с  $m(k) = o_j + d_j k - \frac{1}{2}(d_j + 1)$  и  $s_j^0 = s_j$  (7)

необходимое смещение каждого смещения  $o_j$  можно оценить по индексу последовательности  $k$ , для которого выполняется  $s_j^k \approx 0$ . Дополнительный коэффициент штрафования  $f_{\text{penalty}} \geq 1$  позволяет ограничить смещения и предотвратить выбросы. Таким образом, алгоритм DLB уточняет разбиение во время моделирования. Этот подход иллюстрируется с помощью уравнения (1) для второго смещения домена  $o_2$ , используя штрафной коэффициент  $f_{\text{penalty}} = 1.25$ . Согласно формуле (7), начальный совокупный дисбаланс  $s_2 = 0.45$  минимизируется путем сдвига смещения на две ячейки разделения, что дает смещение нового домена

$$s_2^0 = 0.45 \rightarrow s_2^1 = 0.45 - 1.25 \cdot 1.2 \cdot 0.1 = 0.3$$

$$0.3 - 1.25 \cdot 1.2 \cdot 0.15 = 0.075$$

Кроме того, путем введения факторов производительности, оценивающих скорость обработки на разных вычислительных узлах, этот подход может быть расширен и нацелен также на вычисления на разнородных вычислительных аппаратных средствах. Относительная производительность обработки может быть определена путем соотношения локальной нагрузки с обратной величиной относительной рабочей нагрузки домена. Вес мощности для количественной оценки относительных скоростей вычислений [19], находится в таком виде:  $p_j = l_i \bar{W} / W_i$ . Используя соответствующие вычислительные мощности в качестве дополнительного фактора в процедуре итерации, приведенной в формуле (7), большая рабочая нагрузка может быть перенесена из более медленных процессов в более быстрые и наоборот. Например, учитывая высокую и низкую вычислительную мощность  $p_{i-1} = 0.8$  и  $p_i = 1.2$ , рабочая нагрузка, смещенная с более быстрого на более медленные процес-

сы, взвешивается с коэффициентом  $p_i/p_{i-1}=1.5$ . В целом, этот подход DLB подходит для приложений со статическим или динамическим дисбалансом нагрузки. В последнем случае, однако, стоимость частого перераспределения должна быть сбалансирована с потенциальным увеличением производительности. В этом исследовании используется последовательная версия алгоритма DLB, которая требует сбора рабочих нагрузок ячейки раздела в одном домене. Чтобы снизить накладные расходы на связь и требования к памяти, возможно расширение иерархической параллельной версии. Тем не менее, при наличии только одного значения на вычислительную ячейку раздела объема связи довольно низок по сравнению, например, с большим количеством информации о нагрузке [20].

#### **Результаты численного моделирования и параллельный анализ эффективности**

В результате численного моделирования аэродинамики носовой полости человека получены следующие данные. Для проведения анализа параллельного численного алгоритма использовались данные из статьи [15], где описаны профили продольной компоненты скорости и температуры в трех поперечных сечениях. Среднее время, потраченное на шаг времени моделирования разделено на вычисления и связь между всеми параллельными поддоменами. При использовании DLB общая вычислительная нагрузка распределяется между параллельными поддоменами более равномерно, в то время как одновременно в вычислении CFD участвует больше рангов. Процент дисбаланса  $I_{\%}$  уменьшен с 31% до 9%, что соответствует значительному улучшению производительности при экономии времени выполнения на 22%. Как показывает этот показатель дисбаланса, потенциальная экономия еще выше при условии идеального баланса нагрузки. Однако, что касается сложности полностью связанного моделирования с резко изменяющимися составами нагрузки, и без того достаточно хорошее начальное разбиение значительно улучшается. Автоматический алгоритм DLB работает с минимальной информацией о типе задач. Суммарные

вычислительные ресурсы, требуемые для одного шага по времени моделирования с сильным масштабированием от 28 до 80 вычислительных ядер без DLB и с DLB, изображены на рисунке 1. Кроме того, среднее время простоя показано для каждой конфигурации. Для меньшего числа вычислительных ядер параллельные вычисления демонстрируют лишь небольшой дисбаланс. Из-за низкой степени параллелизма каждому домену назначается огромная вычислительная нагрузка, которая сохраняет дисбалансы, вызванные, например, неточными вычислительными весами. Тем не менее, для DLB наблюдаются небольшие улучшения в отношении общей параллельной производительности. Во время масштабирования дисбалансы нагрузки в эталонном моделировании начинаются с процента дисбаланса  $I_{\%}=9.6\%$  для 28 ядер и увеличиваются до  $I_{\%}=31\%$  для 84 ядер. Одновременно общий объем вычислительных ресурсов, необходимых для выполнения вычислений в моделировании, увеличивается почти на 20% из-за уменьшения размеров локальных задач. С балансировкой нагрузки дисбалансы уменьшаются до примерно  $I_{\%}=4,6\%$  и  $I_{\%}=22\%$  для моделирования на 28 и 84 вычислительных ядрах. Таким образом, несмотря на то, что все еще есть потенциал для достижения дальнейших улучшений с помощью DLB, выгода увеличивается со степенью параллелизма, экономя 22% вычислительных ресурсов при использовании 84 ядер. Тенденция расчетных весовых соотношений между вычислительными ячейками дает дополнительное представление о худших характеристиках эталонного моделирования при использовании большего числа ядер. Для низких степеней параллелизма весовое соотношение вычислений близко к расчетному априорному значению, которое используется для начального разбиения. Однако для большего числа вычислительных ядер это соотношение значительно уменьшается. Аналогично наблюдениям, основанным на времени вычисления на ячейку и временном шаге это поведение может быть объяснено снижением эффективности решателя при моделировании при уменьшении

размера задачи в каждом параллельном поддомене. Из-за растущего расхождения в отношении предписанного весового соотноше-

ния качество разложения домена постепенно ухудшается и вызывает значительный дисбаланс нагрузки.

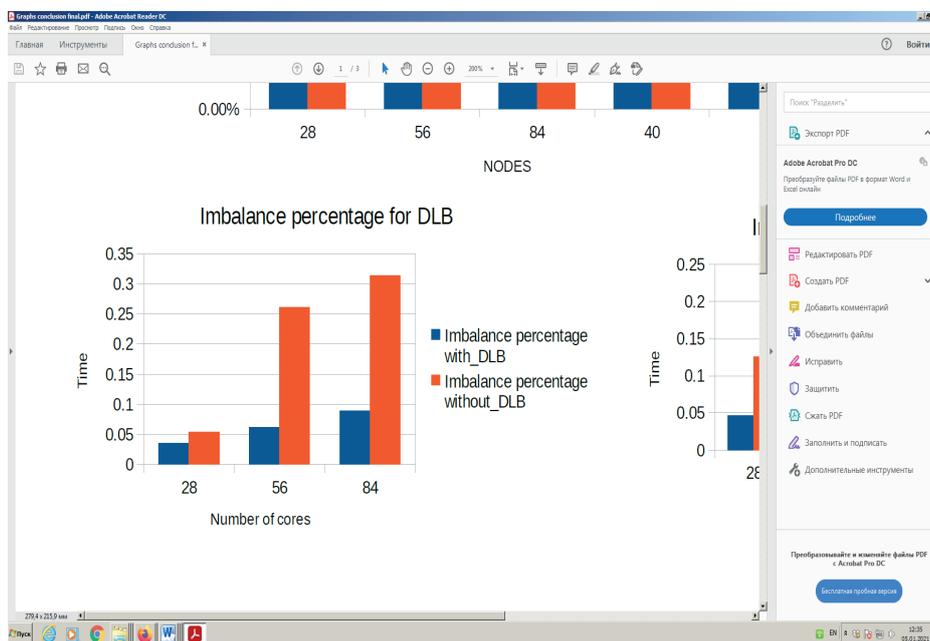


Рис. 1 - Время выполнения с и без использования динамической балансировки нагрузки

### Заключение

Моделирование движения воздуха в носовой полости демонстрирует эффективность схемы DLB для различных крупномасштабных связанных задач. Детальный анализ производительности показал необходимость метода DLB для непосредственного определения дисбалансов нагрузки, которые, например, вызваны индивидуальной эффективностью вычисления в зависимости от состава локальной рабочей нагрузки и масштабируемости отдельных программных кодов. Кроме того, эксперимент с сильным масштабированием показал улучшение производительности при растущей степени параллелизма, когда используются априорные оценочные вычислительные веса для начального разбиения. А также в ходе исследования носовой полости можно сделать следующие выводы, что стенки носовой

полости способствуют нагреву воздуха и появлению вихрей, которые имеют немаловажное значение для перехода входного воздуха в альвеолярное состояние, перед тем как попасть в носоглотку. А также немаловажную роль играет, относительная влажность в носовой полости, так как при низких температурах окружающей среды за счет влажности идет нагревание входного воздуха. Исследования движения воздуха в носовой полости являются актуально значимыми, так как в настоящее время, по разным причинам увеличивается количество людей с проблемами дыхания через нос. Так данная проблема разрешается хирургическим путем, где важно оперировать структуру носа оптимально, так чтобы носовая полость правильно функционировала, поскольку нормальное дыхание должно осуществляется с помощью носовой полости.

### REFERENCES

1. Doorly, D., Taylor, D., Schroter, R., 2008c. Mechanics of airflow in the human nasal airways. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 163, 100–110.
2. Girardin, M., E. Bilgen, and P. Arbour. Experimental study of velocity fields in a human nasal fossa by laser anemometry. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 92:231–236, 1983.

3. Croce, C., Fodil, R., Durand, M., Sbirlea-Apiou, G., Caillibotte, G., Papon, J.-F., Blondeau, J.-R., Coste, A., Isabey, D., Louis, B., 2006. In vitro experiments and numerical simulations of airflow in realistic nasal airway geometry. *Ann. Biomed. Eng.* 34, 997–1007.
4. Keyhani, K., Scherer, P., Mozell, M., 1995. Numerical simulation of airflow in the human nasal cavity. *J. Biomech. Eng.* 117, 429–441.
5. Wang, T., Chen, D., Wang, P., Chen, J., Deng, J., 2016. Investigation on the nasal airflow characteristics of anterior nasal cavity stenosis. *Braz. J. Med. Biol. Res.* 49.
6. Naftali S, Rosenfeld M, Wolf M, Elad D (2005) The air-conditioning capacity of the human nose. *Ann Biomed Eng* 33:545–553.
7. Hendrickson B., Devine K. Dynamic load balancing in computational mechanics, *Comp. Methods in Appl. Mech. Eng.*, vol. 184, no. 2–4, pp. 485–500, Apr. 2000.
8. Pinar A., Aykanat C. Fast optimal load balancing algorithms for 1D partitioning, *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 64, no. 8, pp. 974–996, Aug. 2004.
9. Pilkington J. R., Baden S. B. Dynamic partitioning of non-uniform structured workloads with spacefilling curves, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 7, no. 3, pp. 288–300, Mar. 1996.
10. Lieber M., Nagel W. E. Scalable high-quality 1D partitioning, in *HPCS*, 2014, pp. 112–119.
11. Pinar A., Kartal Tabak E., Aykanat C. One-dimensional partitioning for heterogeneous systems: Theory and practice, *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 68, pp. 1473–1486, Nov. 2008.
12. Menon H., Jain N., Zheng G., Kale L. Automated load balancing invocation based on application characteristics, in *IEEE Cluster Comput.*, 2012, pp. 373–381.
13. Issakhov A. Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant under various operational capacities // *Applied Mathematical Modelling*, –2016, Volume 40, Issue 2, pp. 1082–1096
14. Ashby S. The Opportunities and Challenges of Exascale Computing. ASCAC subcommittee, US - DOE Report, 2010.
15. Böhme D. Characterizing Load and Communication Imbalance in Parallel Applications, ser. IAS. Forschungszentrum Jülich, 2014, vol. 23.
16. DeRose L., Homer B., Johnson D. Detecting Application Load Imbalance on High End Massively Parallel Systems, *Parallel Processing*, pp. 150–159, Aug. 2007.
17. Anderson E., Bai Z., Bischof C., Blackford S., Demmel J., Dongarra J., Du Croz J., Greenbaum A., Hammarling S., McKenney A., Sorensen D. *LAPACK Users' Guide*, 3rd ed. SIAM, 1999. ISBN 0-89871-447-8
18. Lieber M., Gößner K., Nagel W. E. The potential of diffusive load balancing at large scale, in *EuroMPI*, 2016, pp. 154–157.
19. Zhang X., Yan Y. Modeling and characterizing parallel computing performance on heterogeneous networks of workstations, *Parallel Distrib. Comput.*, pp. 25–34, Oct. 1995.
20. Zheng G., Bhatel  A., Meneses E., Kal  L. V. Periodic hierarchical load balancing for large supercomputers, *Int. J. High Perform. Comput. Appl.*, vol. 25, no. 4, pp. 371–385, Nov. 2011.

---

### Information about authors:

1. Assylbek A. Issakhov – PhD Doctor, Head and Professor of the Scientific and Educational Center of Mathematics and Cybernetics KBTU, Kazakh-British Technical University, st. Tole bi 59  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-7988> Email: [a.isakhov@kbtu.kz](mailto:a.isakhov@kbtu.kz)
2. Aizhan B. Abylkasymova – MSc in Computer Science, senior lecturer of the Scientific and Educational Center of Mathematics and Cybernetics, Kazakh-British Technical University, st. Tole bi 59  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5967-6959>  
Email: [abylkassymova.aizhan@gmail.com](mailto:abylkassymova.aizhan@gmail.com)
3. Madina Ye. Mansurova – PhD of Physico-mathematical Sciences, Associate professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9680-2758>  
Email: [Mansurova.madina@gmail.com](mailto:Mansurova.madina@gmail.com)

## FAULT DETECTION OF INDUCTION MOTORS

YESSENOVA G.S.

*Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan*

**Abstract.** *In this work described method of fault detection of induction motors. Induction motors are broadly utilized in numerous mechanical applications. Subsequently, it is exceptionally imperative to monitor and detect any faults during their operation in arrange to alarm the administrators so that potential issues can be avoided before they happen. In common, a fault within the acceptance motor causes it to induce hot amid its operation. This paper presents a developed protection method algorithm that uses unbalanced power components and simulates the overall design based on the Matlab Simulink. Three-phase voltage and current data are observed first, followed by signs of unbalanced power; according to the digital relay safety algorithm. The relay then uses a negative sequence reactive power sign to decide if the fault is internal or external. A negative sign for negative sequence reactive power indicates a fault inside the motor, while a positive sign indicates a fault outside the motor.*

**Key words:** *stator windings, reactive power, squirrel rotor cage, motor backup, power oscillations.*

## ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ЕСЕНОВА Г. С.

*Казахстанско-Британский технический университет, 050000, Алматы, Казахстан*

**Аннотация.** *В данной работе описан метод обнаружения неисправностей асинхронных двигателей. Асинхронные двигатели широко используются во многих механических приложениях. Следовательно, крайне важно отслеживать и обнаруживать любые сбои во время их работы, чтобы предупредить администрацию, чтобы можно было избежать потенциальных проблем до их возникновения. Обычно неисправность в приемном двигателе вызывает нагрев во время работы. Этот тезис обеспечивает разработанный алгоритм метода защиты, который использует несбалансированную составляющую мощности и моделирование всего проекта на основе Matlab Simulink. Согласно алгоритму цифровой релейной защиты, во-первых, наблюдаются данные трехфазного напряжения и тока, после чего обнаруживаются какие-либо признаки несбалансированной мощности. На следующем этапе реле определяет тип отказа, внутренний или внешний, используя знак реактивной мощности обратной последовательности. Отрицательный знак реактивной мощности обратной последовательности означает, что неисправность находится внутри двигателя, с другой стороны, положительный знак указывает на то, что неисправность произошла вне двигателя.*

**Ключевые слова:** *обмотки статора, реактивная мощность, короткозамкнутый ротор, резерв двигателя, колебания мощности.*

## ИНДУКЦИЯЛЫҚ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРДЫҢ АҚАУЛАРЫН АНЫҚТАУ

ЕСЕНОВА Г. С.

*Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан*

**Аңдатпа.** *Бұл жұмыста асинхронды қозғалтқыштардағы ақауларды анықтау әдісі сипатталған. Асинхронды қозғалтқыштар көптеген механикалық қосымшаларда кеңінен қолданылады. Демек, жұмысшыларды ескерту үшін олардың жұмысы кезінде орын алған бұзушылықтарды бақылау және*

анықтау өте маңызды, сондықтан олар пайда болғанға дейін алдын алу жағы қарастырылады. Әдетте, қабылдау қозғалтқышындағы ақаулық жұмыс кезінде қызуды тудырады. Бұл диссертация теңгерілмеген қуат компонентін қолданатын және Matlab Simulink имитациялық бағдарламасына негізделген бүкіл дизайнды имитациялайтын қорғаныс әдісінің дамыған алгоритмін ұсынады. Сандық релелік қорғаныс алгоритмі бойынша, біріншіден, үш фазалы кернеу мен ток деректері байқалады, содан кейін теңгерімсіз қуаттың кез келген белгілері анықталады. Келесі қадамда реле реактивті қуаттың теріс дәйектілігін пайдаланып, ішкі немесе сыртқы істен шығу түрін анықтайды. Теріс дәйектіліктің реактивті қуатының теріс белгісі ақаулықтың қозғалтқыш ішінде екенін білдіреді, екінші жағынан, оң белгі ақаулықтың қозғалтқыштан тыс екендігін көрсетеді.

**Түйінді сөздер:** статор орамдары, реактивті қуат, тиін-торлы ротор, қозғалтқыш қоры, қуаттың ауытқуы.

### Introduction

Induction motor is the primary necessity motor used in mechanical applications. Three phase induction motors are the most growing and frequently encountered machines in enterprises. An electromechanical system, called electric motor, which converts electrical energy into a mechanical energy. The most sorts of issues experienced by these motors are single staging, over voltage, beneath voltage, over current, under current, speed varieties, over temperature and vibration. Acceptance motors are broadly utilized as mechanical drives since they are tough, dependable and prudent. Single-phase acceptance motors are utilized broadly for littler loads, such as family apparatuses like fans. When the three stage induction motor supply with higher voltage than rated at that point induction motor begins overheated and consequently over temperature blame happens. When supply voltage is lower than evaluated constrain at that point voltage drop over the resistance is higher and blame occurs. Even, as three-stage Induction motor operates continuously, it is important to ensure these weaknesses are addressed to the motor. Induction motor safety plays a critical role in its long service life benefit [1]. Until now, a definite number of protection methods have been developed for various internal and external motor faults, depending on the motor power, motor type, motor application, and service type. Therefore, motor safety in general is less uniform than the defenses of other sections of the control system [2]. Protection given to the motor is to allow the motor to operate up to its limits, but not to allow the motor to operate above its mechanical and thermal limits in

overloading and to provide optimum flexibility in detecting faults, hence the safety mechanism should detach defective parts from other parts of the power system as soon as possible, without damaging other systems detrimental to the power network and control system. The machine shaft or rotor has been continuously associated with the primary common fault sorts of these turning devices. The components of induction motor's percentage failure are as shown in Fig 1.

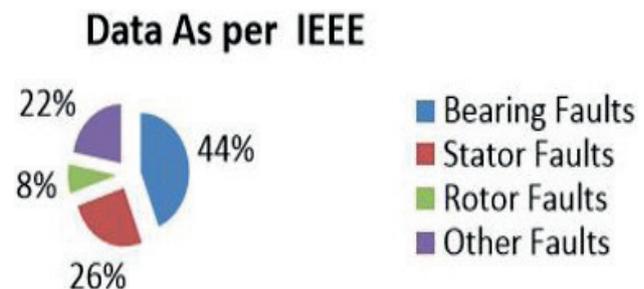


Fig. 1. Percentage Component of Induction Motor Failure

The survey was taken by Institution of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) and Electric Power Research Institute [3].

### Materials and methods

Three-phase induction motors, as is known, have simple construction of stator windings from where they are supplied, thus producing rotating magnetic field in the air gap. On the other hand, the rotor side depends on the required efficiency. This is a rotor with a phase winding, a cage with a squirrel-cage rotor. The rotor side of an induction motor has a high conductivity value, so the magnetic flux can change direction regularly due to the rotating magnetic field [4].

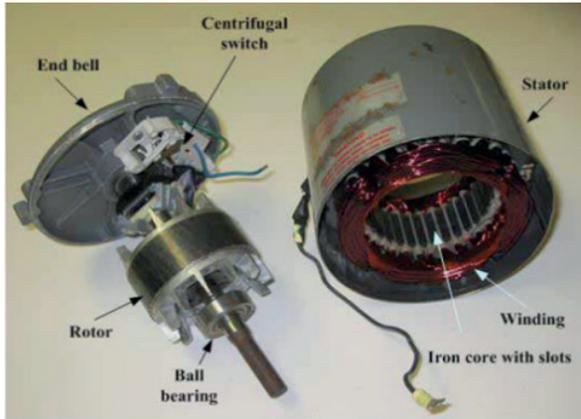


Fig. 2. Asynchronous machine components

In order to find a solution to faults in the work, it was necessary to analyze the causes of these faults. There are described in Figure below.

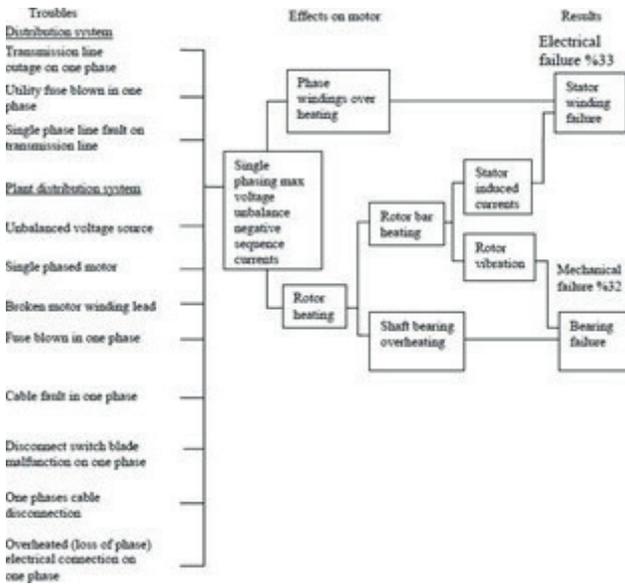


Fig. 3. Single phasing effects on induction motor operation [5]

First, the algorithm of the protection method for the protection of the induction motor is used to solve the problem of abnormal operation due to internal and external defects of the machine. This section briefly describes the security process. As it is written, the instantaneous power of the car.

When an error occurs, it vibrates twice its basic frequency. Thus, the data are taken from the first power system. These are the voltage and current values for each phase, and the other data needed to run the algorithms A, B, and C are the total power of the motor. The maximum limit sequence of unbalanced power and reverse

current of a motor operating in an unbalanced state, constant capacity  $K$ , is equal to the number of tests for the period and time for this purpose. Thus, after obtaining the necessary information, the code determines whether an error has occurred based on the measured and compared values, whether the error is internal or external. A more detailed description of the mechanism is given in the next chapter of the study. It also gives a travel signal if it is likely to fail in the form of a failure.

Required values	Calculated values
$V_a, V_b, V_c$ - 3 phase voltage values	$P_m$ - Instantaneous power
$I_a, I_b, I_c$ - 3 phase current values	
$S_n$ - Apparent power	
$P_{unb}$ - Unbalanced power limit	$Q^-$ - Negative sequence reactive power
$I_{ng}$ - Negative sequence current limit	$A$ - integrator value for external fault
$K$ - constant	
$N$ - number of samples	
$\Delta t$ - time for sampling	

Fig. 4. Required and calculated value list

### Solutions and results

This study provides a solution and description of the system of algorithms for the safety of an induction motor in unbalanced situations that can occur inside the motor or in defects that are considered external. The algorithm first looks for flaws in instantaneous power fluctuations caused by zero and negative sequence elements, then doubles the base frequency and investigates the negative reactive power circuit's source. This section delves into the algorithm's specifics.

The instantaneous power of induction motors is calculated at the terminals and can be reported as follows:

$$P(n) = v_R(n) * i_R(n) + v_S(n) * i_S(n) + v_T(n) * i_T(n). \quad (1)$$

Here  $n$  can be defined as an instantaneous example of the power  $p(n)$ . This formula means of the above-managed state of the engine. However, when a short circuit occurs, the phase difference between the stator windings is  $2\pi / 3$  asymmetric, and the following formulas are derived for the three-phase values of voltage and current.

The unbalanced power component generated by the negative sequence component can be converted into a shape by the Discrete Fourier Transform.

$$P_{2m} = \frac{2}{N} \sum P(n) * e^{-j4\pi n/N} \quad (2)$$

In the event of a failure, the orientation of the negative reactive series calculated suggests that the failure is internal or external [6]. The negative sign of the Q-shows that the power transfer is from system to network, indicating that the fault is local. Vice versa of the sign indicates that there was a fault within the motor.

$$Q^- = a3/N \sum v^-(n - \pi/2) * i^-(n) \quad (3)$$

Here, v- and i- can be specified as follows:

$$v^-(n) = (v_R(n) + v_S(n - 2\pi/3) + v_T(n + 2\pi/3))/3 \quad (4)$$

$$i^-(n) = (i_R(n) + i_S(n - 2\pi/3) + i_T(n + 2\pi/3))/3 \quad (5)$$

Calculations:

Firstly, the value of  $P_{2m}$  is calculated, and if it is higher than the allowable value of  $P_{unb}$ , then the problem occurs, and then the algorithm begins to calculate the reactive power of the Q-negative sequence. If the measured value is negative, the fault appears to be internal and an immediate shutdown signal is given to isolate the faulty motor.

Secondly, the algorithm calculates the reaction of the negative sequence in the case of the following possible situation, resulting in a positive sign. Therefore, the fault is an external style fault, and the initial equation of the algorithm is used to measure the departure time to back up the engine.

$$P_{2m} (pu) = (VI^-)/VI = I^-/I = I^-(pu) \quad (6)$$

$$[P_{2m} (pu)a]^2 * t = K \quad (7)$$

Typically, the equilibrium protection time using Equation [7] is defined differently for different types of motors. The constant K, which is the resistance to unbalanced activity under the influence of the heat of the motor winding of an induction machine, varies depending on the type of motor associated with its characteristics. There is a difference in the value of K according to IEC standards from 1 to 40 [7, 8]. For modeling in the thesis, the value of K is assumed to be equal to 11.

The complete diagram of the induction protection system is shown in the figure below. [7].

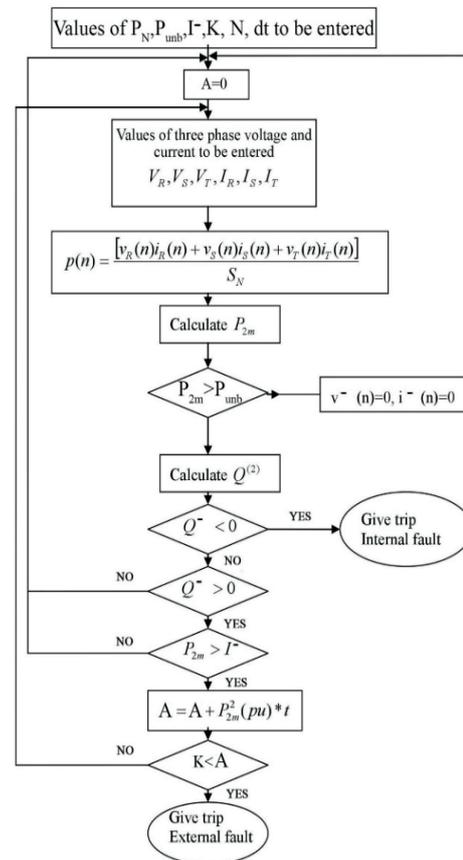


Fig. 5. Motor protection flow diagram

### Simulation

The dissertation was submitted by MATLAB / Simulink system software, which measures the performance of the simulation defects. For one fault type situation, two phases to the ground were provided with this simulation of the single phase to the ground. External problems were interpreted as problems with the motor's cables. The diagram below depicts the virtual machine scheme.

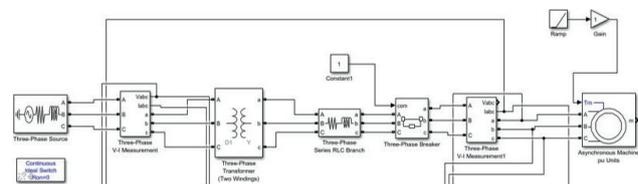


Fig. 6. Simulated model

The motor in this case was a 10 HP squirrel cage asynchronous system operating at full load. The power transformer used in the simulation was a delta-star coupled transformer with a primary voltage of 13.8 kV and a secondary voltage of 0.22 kV. It's also worth remembering that the machine's frequency was 60 Hz. The fault was

thought to have started in the second and lasted two seconds during the simulation period of five seconds. For the simulation unit, the short circuit resistance was set to 0.01 ohms.

Cases for external faults

External faults on the asynchronous machine's power supply cables are identified, and the system was tested in three scenarios, yielding graphs of instantaneous power, unbalanced power, and negative sequence intensity. For simulation, the K constant was set to 11.

Two phases to ground fault

The two processes are short-circuited to the ground in this case, and the fault occurs as described in the second. When an imbalance occurs, the chart shows that power oscillations have begun. As the unbalanced power begins to remain constant after 20 ms, the algorithm begins to measure negative sequencing power.

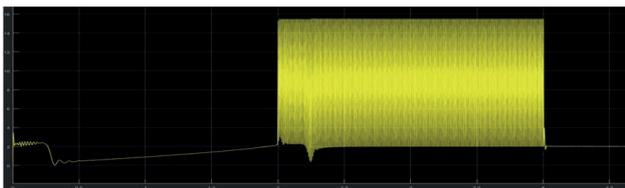


Fig. 7. Instantaneous power

Figure 8 shows that negative sequence reactive power has a positive symbol, indicating that the fault is located externally.

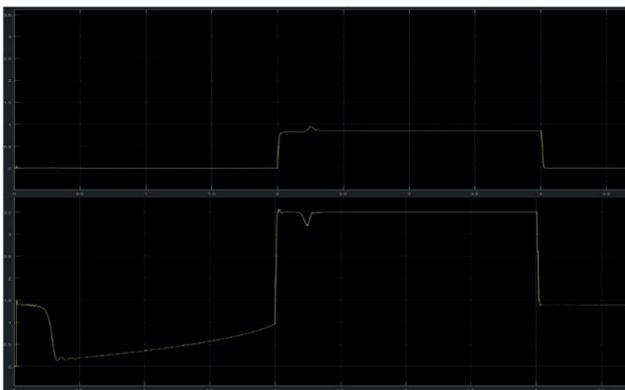


Fig. 8. Negative sequence and Unbalanced power

Single phase to ground

Decrease in average power happens as one of the processes is short-circuited to grounded and fault happens at this point. It can be seen from the figure that the negative sequencing power is positive, so the fault is external as expected.

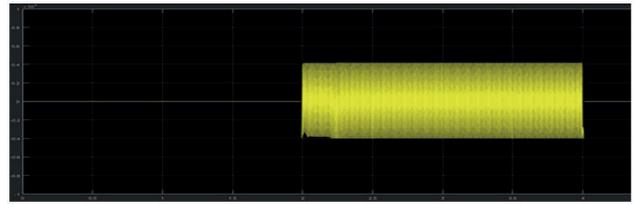


Fig. 9 Instantaneous power

120 Hz oscillations occur, causing an unfavorable state for the induction motor during unbalanced activity.

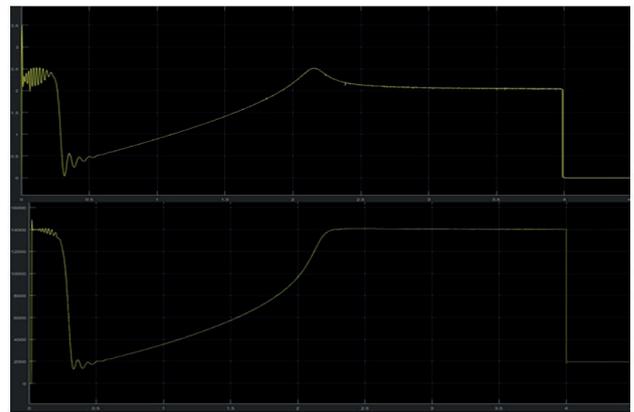


Fig. 10. Negative sequence and Unbalanced power

The trip time to protect the motor is estimated to be 4.5 seconds, preventing damage to an induction motor. As it's shown on figures, external fault detected and system shut down to protect motor and other equipment. It means that system works correctly, faster and corresponds all requirements.

Conclusion

In addition, the protection system is vital for any unit or component of the electrical power network because it is affected by potential irregular conditions. The induction motor, which is one of the most commonly used electrical machines, is often susceptible to failure, which means that the safe operation of an accurate protection method is required. In the simulation of the fault conditions for the induction motor, as a consequence, the safety device first detected a defective state from power oscillations at a two-fold base frequency before determining the type of fault based on the indication of a negative reactive power series. In a balanced network, instantaneous power is equal to the average power value, therefore, when an unbalanced

condition occurs, the fault is detected, and when the internal form of fault relay is specified, the instant trip command is given. Today, it is important to provide reliable protection for every aspect of the electrical system because it is effective in many ways, including continuous regular operation of the network, efficiency and health of the equipment. Moreover, the devitalized age of technology allows society to

develop all of the security mechanisms that have been developed, so that they can be quicker or better, more effective and perfect for prejudice, helping to plug the gaps produced by unreliable circumstances or irregular cases. Future simulation of an internal faults is planned. For the simulation internal faults will be assume to take place in stator windings.

## REFERENCES

1. Katakwar, Gaurav R Sawarbandhe, Moreshwar J Jenekar, Priyanka N Tausif. (2018). Three Phase Induction Motor Protection System by using PIC Microcontroller: International Journal for Scientific Research and Development: 2034-2037.
2. T.S. Madhana, (1989). Power System Protection Static Relays with Micro Processor Applications, McGraw-Hill, 115-517.
3. S. Khadim (2014). Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor - A Review: International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering: 2320-3765.
4. <http://chettinadtech.ac.in/storage/12-07-12/12-07-12-10-43-28-1527-Thenmozhi>, 01.06.2018.
5. G.J. Paoletti, A. Rose, (1989) Improving Existing Motor Protection for Medium Voltage Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, 456-464.
6. K. Sayman, (2005). A new digital relaying method for induction motor induction protection, Istanbul Technical University, Turkey.
7. A. Maitra, C. Melhorn, (2000) Automated Detection of Voltage Unbalance Conditions, The American National Standards Institute (ANSI).
8. M. Bayrak, (2000) A New Digital Protection Algorithm Design for Generators, ITU (Turkey).

---

### Information about author:

1. Gaukhar S.Yessenova – Automation and Control Engineer, WoodKSS Atyrau, Kazakh-British Technical University, Tole bi 59

## О ЗАПРОСАХ БАЗ ДАННЫХ НАД ПОЧТИ ОМЕГА-КАТЕГОРИЧНОЙ УПОРЯДОЧЕННОЙ ОБЛАСТЬЮ

**КУЛПЕШОВ Б. Ш., МУСТАФИН Т. С.**

*Казахстанско-Британский технический университет, 050000, Алматы, Казахстан*

**Аннотация.** Мы исследуем реляционные базы данных над упорядоченной областью определения с некоторыми дополнительными отношениями – типичным примером является упорядоченное множество рациональных чисел с операцией сложения. В фокусе наших исследований запросы первого порядка, инвариантные относительно перестановок, сохраняющих порядок, – такие запросы называются порядково-генерическими. Установлено, что для некоторых областей порядково-генерические запросы первого порядка сводятся к запросам чистого порядка. Здесь мы доказываем теорему сводимости над почти омега-категоричной слабо  $o$ -минимальной областью определения, имеющей ранг выпуклости 1.

**Ключевые слова:** упорядоченная структура, слабая  $o$ -минимальность, состояние базы данных, запрос баз данных, почти омега-категоричность, ранг выпуклости.

## ОМЕГА-КАТЕГОРИЯ АЯСЫНДА РЕТТЕЛГЕН МӘЛІМЕТТЕР БАЗАСЫНЫҢ СҰРАУЛАРЫ ТУРАЛЫ

**КУЛПЕШОВ Б. Ш., МУСТАФИН Т. С.**

*Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан*

**Аңдатпа.** Біз реляциялық мәліметтер базасын қосымша қатынастармен реттелген аңықтау облысы бойынша зерттейміз – типикалық мысалы қосу операциямен рационалдық сандар реттелген жиыны болады. Біздің зерттеуіміз бірінші ретті сұраныстарға бағытталған, олар ретті сақтайтын ауыстыруға қатысты инвариантты болады – мұндай сұраныстар рет-генерикалық деп аталады. Кейбір облыстар үшін бірінші ретті рет-генерикалық сұраныстар таза реттік сұраныстарға дейін азайтылатыны анықталды. Мұнда біз дәлелдік рангісі 1 омега-категориялық дерлік әлсіз  $o$ -минималды анықтау аясында редукция теоремасын дәлелдейміз.

**Түйінді сөздер:** реттелген құрылым, әлсіз  $o$ -минималдық, мәлімет базасының күйі, мәлімет базасының сұранысы, омега-категориялық дерлік, дәлелдік рангісі.

## ON DATABASE QUERIES OVER ALMOST OMEGA-CATEGORICAL ORDERED DOMAIN

**KULPESHOV B.SH., MUSTAFIN T.S.**

*Kazakh-British technical university, 050000, Almaty, Kazakhstan*

**Abstract.** We consider relational databases organized over an ordered domain with some additional relations – a typical example is the ordered domain of rational numbers together with the operation of addition. In the focus of our study are the first-order (FO) queries that are invariant under order-preserving permutations – such queries are called order-generic. It was discovered that for some domains order-generic FO queries fail to express more than pure order queries. Here we prove the collapse result theorem over an almost omega-categorical weakly  $o$ -minimal domain having convexity rank 1.

**Keywords:** *ordered structure, weak o-minimality, database state, database query, almost omega-categoricity, convexity rank.*

### Введение

В реляционной модели баз данных, введенной Э.Ф. Коддом [1–2], состояние базы данных понимается как конечная совокупность отношений между элементами. Имена отношений и их арности (местности) фиксируются и называются *схемой базы данных*. Отдельная информация, хранимая в отношениях данной схемы, называется *состоянием базы данных*. Хотя реляционные базы данных были придуманы для конечных совокупностей данных, часто удобно предполагать, что существует бесконечная *область определения* – например, целые или рациональные числа, – так что элементы данных выбираются из этой области. Функции и отношения, определенные на всей области определения (например,  $<$  и  $+$ ), могут быть также использованы при запрашивании. Например, если в качестве языка запросов используется язык логики предикатов первого порядка, то запросы могут использовать как отношения базы данных, так и отношения области определения, при этом переменные изменяются на всей области определения. Выразительная сила запросов баз данных исследовалась в работах [3–10].

### Формальная постановка

Пусть  $M$  – бесконечная структура сигнатуры  $L$ . Здесь мы рассматриваем упорядоченные структуры. Это означает, что  $L$  включает бинарный реляционный символ  $<$ , интерпретация которого в  $M$  удовлетворяет аксиомам линейного порядка. Мы фиксируем схему базы данных  $SC$  и вводим следующие обозначения:

$$L_0 = \{<\}, \quad L' = L_0 \cup SC, \quad L'' = L \cup SC.$$

*Запрос базы данных* может быть формально определен как отображение, которое принимает состояние базы данных и производит новое отношение фиксированной арности над  $M$ . Мы рассматриваем два языка для запрашивания. Запросы первого языка есть формулы сигнатуры  $L'$  – мы называем их *ограниченными*. Запросы второго языка есть формулы сигнатуры  $L''$  – мы называем их *расширенными*.

Итак, базы данных предназначены для

хранения текущей информации о как-то структурированной предметной области. В каждый момент времени эта информация является *конечной* и представляет собой *конечный набор конечных таблиц*. Обычно число таблиц и устройство каждой таблицы не меняются с течением времени, но меняются строки таблиц. Могут добавляться новые строки и удаляться некоторые старые. Строки хранящихся таблиц представляют собой конечные последовательности элементов. Число элементов каждой последовательности фиксировано для фиксированной таблицы. Устройство таблицы практически и есть число элементов в каждой строке этой таблицы. Более формально каждая таблица – это конечно местное конечно отношение, а сама база данных – это конечный набор конечно местных конечных отношений. Для удобства разговора о базе данных каждому ее отношению приписывают некоторое имя с указанием числа аргументов (или местности) этого имени отношения. *Схема* (или *сигнатура*) базы данных и есть конечная последовательность этих имен отношений с указанием местности каждого имени. В каждый момент времени именам отношений из этой схемы присвоены некоторые отношения соответствующих местностей. Это *состояние* базы данных в данный момент.

Состояние называется *конечным*, если все его отношения конечны. Иногда удобно рассматривать не произвольные состояния базы данных, а ограниченные какими-то условиями. Типичным ограничением является условие, что элементы всех строк всех таблиц выбраны из фиксированного подмножества  $I$  универсума. Другими словами, каждому имени отношения из рассматриваемой схемы базы данных поставлено в соответствие отношение той же местности на множестве  $I$ . В этом случае говорят, что рассматриваемое состояние базы данных является состоянием над  $I$ .

Мы будем рассматривать *локально генерические запросы*, которые являются инвариантами при любых сохраняющих линей-

ное упорядочение отображениях конечных подмножеств универсума в универсум. Грубо говоря, ответ на такой запрос основывается на хранящейся информации, но не зависит от способа кодировки этой информации при хранении.

– Определение 1. Будем говорить что  $k$ -арный запрос  $\Theta$  является *локально генерическим над конечными состояниями*, если  $\bar{a} \in \Theta$  тогда и только тогда когда  $\phi(\bar{a}) \in \Theta(\phi(s))$  для любого частичного  $\leftarrow$ -изоморфизма  $\phi : X \rightarrow M$ , где  $X \subseteq M$  для любого конечного состояния  $s$  над  $X$  и для любого  $k$ -кортежа  $\bar{a}$  в  $X$ .

Состояние  $S$  обогащает универсум  $M$  сигнатуры  $L$  до  $L''$ -структуры, которую мы будем обозначать как  $(M, s)$ .

Определение 2.  $\rho$ -состояние  $s$  для  $L$ -структуры  $W$  называется *псевдоконечным* в  $W$ , если  $(W, s)$  есть модель  $L''$ -теории первого порядка всех структур  $(W, r)$ , где  $W$  – конечное состояние над  $W$ .

Псевдо-конечное множество – это частный случай псевдоконечного состояния. Имеется в виду сигнатура, состоящая из одного одноместного отношения и некоторых других отношений. Рассматриваются такие системы этой сигнатуры, на которых выполняются все замкнутые формулы логики предикатов, истинные на всех конечных системах этой сигнатуры. Тогда интерпретация этого одноместного отношения в такой системе называется псевдоконечным множеством.

Определение 3. Будем говорить что полная теория  $T$  имеет *Свойство Изоляции*, если существует кардинал  $\lambda$  такой, что для любого псевдоконечного множества  $A$  и для любого элемента  $a$  модели теории  $T$  существует  $A_0 \subseteq A$  такое, что  $|A_0| < \lambda$  и  $\text{tr}(a/A_0)$  изолирует  $\text{tr}(a/A)$ .

Для произвольных подмножеств  $A, B$  структуры  $M$  пишут  $A < B$ , если  $a < b$  всякий раз, когда  $a \in A$  и  $b \in B$ . Если  $A \subset M$  и  $x \in M$ , то пишут  $A < x$ , если  $A < \{x\}$ . Для произвольного полного 1-типа  $p$  через  $p(M)$  обозначают множество реализаций типа  $p$  в  $M$ . *Открытым интервалом*  $I$  в структуре  $M$  называется параметрически определяемое подмножество структуры  $M$  вида  $I = \{c \in$

$M : M \mid = a < c < b\}$  для некоторых  $a, b \in M \cup \{-\infty, \infty\}$ , где  $a < b$ . Аналогично можно определить *замкнутые, полуоткрытые-полузамкнутые* и т.п. интервалы в  $M$ , так что, например, произвольная точка структуры  $M$  является сама (тривиальным) замкнутым интервалом. Подмножество  $A$  структуры  $M$  называется *выпуклым*, если для любых  $a, b \in A$  и  $c \in M$  всякий раз, когда  $a < c < b$  следует, что  $c \in A$ .

Данная статья касается понятия *слабой о-минимальности*, первоначально глубоко исследованного Д. Макферсоном, Д. Маркером и Ч. Стайнхорном в [11]. *Слабо о-минимальная структура* есть линейно упорядоченная структура  $M = (M, =, <, \dots)$  такая, что любое определяемое (с параметрами) подмножество структуры  $M$  является объединением конечного числа выпуклых множеств в  $M$ . Напомним, что такая структура  $M$  называется *о-минимальной*, если каждое определяемое (с параметрами) подмножество структуры  $M$  является объединением конечного числа интервалов в  $M$ . Таким образом, слабая о-минимальность является обобщением о-минимальности. Ранг выпуклости формулы с одной свободной переменной введен в [12].

Определение 4. [12] Пусть  $M$  – линейно упорядоченная структура,  $\phi(x)$  –  $M$ -определяемая формула с одной свободной переменной. *Ранг выпуклости* формулы  $\phi$  ( $RC(\phi(x))$ ) определяется следующим образом:

- 1)  $RC(\phi(x)) \geq 1$ , если  $\phi(M)$  бесконечно
- 2)  $RC(\phi(x)) \geq \alpha + 1$ , если существует параметрически определяемое отношение эквивалентности  $E(x, y)$ , такое что существуют  $b_i, i \in \omega$ , которые удовлетворяют следующим условиям:

- $\rightarrow$  Для любых  $i, j \in \omega$ , всякий раз когда  $i \neq j$ , тогда  $M \models \neg E(b_i, b_j)$
- $\rightarrow$  Для любого  $i \in \omega, RC(E(x, b_i)) \geq \alpha$
- $\rightarrow$  Для любого  $i \in \omega, E(M, b_i)$  выпукло и  $E(M, b_i) \subset \phi(M)$

3.  $RC(\phi(x)) \geq \delta$ , если  $RC(\phi(x)) \geq \alpha$  для всех  $\alpha \geq \delta$ , ( $\delta$  предельный ординал). Если  $RC(\phi(x)) = \alpha$  для некоторого  $\alpha$ , мы говорим что  $RC(\phi(x)) \geq \alpha$  для всех  $\alpha$ ) мы полагаем  $RC(\phi(x)) = \infty$ .

В частности, теория имеет ранг выпукло-

сти 1, если не существует определимого (с параметрами) отношения эквивалентности с бесконечным числом выпуклых бесконечных классов. Очевидно, что о-минимальная теория имеет ранг выпуклости 1.

Определение 5. [13] Пусть  $M$  – слабо о-минимальная структура,  $A, B \subseteq M$ ,  $M - |A|^+$ -насыщенна,  $p, q \in S_1(A)$  – неалгебраические. Будем говорить, что тип  $p$  не является слабо ортогональным типу  $q$ , если существуют  $A$ -определимая формула  $H(x, y)$ ,  $\alpha \in p(M)$  и  $\beta_1, \beta_2 \in q(M)$  такие что  $\beta_1 \in H(M, \alpha)$  и  $\beta_2 \notin H(M, \alpha)$

Определение 6. [14, 15] Пусть  $T$  – полная теория,  $p_1(x_1), \dots, p_n(x_n) \in S_1(\emptyset)$ . Тип  $q(x_1, \dots, x_n) \in S_n(\emptyset)$  называется  $(p_1, \dots, p_n)$ -типом, если  $q(x_1, \dots, x_n) \supseteq \bigcup_{i=1}^n p_i(x_i)$ . Множество всех  $(p_1, \dots, p_n)$ -типов теории  $T$  обозначается через  $S_{p_1, \dots, p_n}(T)$ . Счетная теория  $T$  называется почти омега-категоричной, если для любых типов  $p_1(x_1), \dots, p_n(x_n) \in S_1(\emptyset)$  существует лишь конечное число типов  $q(x_1, \dots, x_n) \in S_{p_1, \dots, p_n}(T)$ .

Почти омега-категоричность тесно связана с понятием эренфойхтовости теории. Так, в работе [14] доказано, что если  $T$  почти омега-категоричная теория, имеющая ровно три счетные попарно неизоморфные модели, то в теории  $T$  интерпретируется плотный линейный порядок. Тем не менее существует пример (построенный Перетятыкиным М.Г. в [16]) теории, имеющей ровно три счетные попарно неизоморфные модели, но не являющейся почти омега-категоричной.

В работе [17] установлены почти омега-категоричность эренфойхтовых вполне о-минимальных теорий и выполнимость принципа замены для алгебраического замыкания для почти омега-категоричных вполне о-минимальных теорий. Недавно были доказаны ортогональность любого семейства попарно слабо ортогональных неалгебраических 1-типов над пустым множеством для таких теорий и бинарность почти омега-категоричных вполне о-минимальных теорий [18] и почти омега-категоричных слабо о-минимальных теорий ранга выпуклости 1 [19].

В настоящей работе исследуется проблема выразимости расширенных запросов через ограниченные над почти омега-категоричной

слабо о-минимальной областью определения баз данных, имеющей ранг выпуклости 1. Мы доказываем, что почти омега-категоричная слабо о-минимальная теория ранга выпуклости 1 имеет свойство Изоляции. В качестве следствия мы получаем сводимость расширенных запросов к ограниченному над почти омега-категоричной слабо о-минимальной областью определения.

Результаты.

Теорема 7. [19] Любая почти омега-категоричная слабо о-минимальная теория ранга выпуклости 1 является бинарной.

Теорема 8. [3] Предположим, что теория первого порядка структуры  $M$  имеет Свойство Изоляции. Пусть расширенный запрос  $\Phi$  является локально генерическим над конечными состояниями. Тогда  $\Phi$  эквивалентен над конечными состояниями ограниченному запросу.

Теорема 9. Пусть  $T$  – почти омега-категоричная слабо о-минимальная теория ранга выпуклости 1. Тогда  $T$  имеет Свойство Изоляции.

Доказательство теоремы 9. Пусть  $M$  – достаточно насыщенная модель теории  $T$ . Возьмем произвольные элемент  $a \in M$  и бесконечное множество  $A \subseteq M$  и рассмотрим  $p(x) := tp(a/A)$ . В силу слабой о-минимальности  $p(M)$  выпукло и, следовательно, тип  $p(x)$  определяется выпуклыми формулами.

Случай 1.  $p(x)$  – изолированный. Тогда существует формула  $\phi(x, \bar{b})$ , где  $\bar{b} \in A$ , такая, что  $\phi(M, \bar{b})$  выпукло и  $p(M) = \phi(M, \bar{b})$ . Таким образом, в качестве  $A_0$  можем взять множество элементов из кортежа  $\bar{b}$ .

Случай 2.  $p(x)$  – квазирациональный. Не умаляя общности, предположим, что  $p(x)$  – квазирациональный вправо. Тогда существует выпуклая формула  $U(x, \bar{b})$  для некоторого  $\bar{b} \in A$ , так что  $p(M) \subseteq U(M, \bar{b})$  и  $U(M, \bar{b})^+ = p(M)^+$ . В силу бинарности  $T$  для любой выпуклой формулы  $\phi_i(x, \bar{b}_i) \in p$  левая граница множества  $\phi_i(M, \bar{b}_i)$  определяется выпуклой формулой  $\phi_i^1(x, b_i^1)$  для некоторого  $b_i^1 \in \bar{b}_i$ . В силу почти омега-категоричности попарно неэквивалентных выпуклых формул  $\theta(x, b_i^1)$  с условием  $p(M) \subseteq \theta(M, b_i^1)$  конечное

число. Таким образом, мы заключаем что левая граница множества  $p(M)$  определяется счетным числом констант из  $A$ . Поэтому в качестве  $A_0$  можем взять счетное подмножество множества  $A$ .

Случай 3.  $p(x)$  – иррациональный. В этом случае можно показать аналогично случаю 2, что как левая, так и правая границы множества  $p(M)$ , определяются счетным множеством констант из  $A$ .

Таким образом, в качестве  $\lambda$  можем взять первый несчетный кардинал  $\omega_1$ . Следовательно,  $T$  имеет Свойство Изоляции.

### Заключение

Таким образом, в качестве следствия получаем, что если  $T$  почти омега-категоричная слабо о-минимальная теория ранга выпуклости 1, то любой расширенный запрос, являющийся локально генерическим над конечными состояниями, эквивалентен ограниченному запросу.

Данные исследования поддержаны Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант AP08855544).

### REFERENCES

1. E.F. Codd. A relational model for large shared data banks // Communications ACM. – 1970. – Vol. 13. – No. 6. – P. 377-387.
2. E.F. Codd. Relational completeness of database sublanguages // Database systems. – Prentice-Hall. – 1972. – P. 33-64.
3. M. Benedikt, G. Dong, L. Libkin, L. Wong. Relational expressive power of constraint query languages // Journal of ACM. – 1998. – Vol. 45. – No. 1. – P. 1-34.
4. O.V. Belegradek, A.P. Stolboushkin, and M.A. Taitslin. Extended order-generic queries // Annals of Pure and Applied Logic. – 1999. – Vol. 97. – P. 85-125.
5. M.A. Taitslin. A general condition for collapse results // Annals of Pure and Applied Logic. – 2002. – Vol. 113. – No. 1-3. – P. 323-330.
6. С.М. Дудаков, М.А. Тайцлин. Трансляционные результаты для языков запросов в теории баз данных // Успехи математических наук. – 2006. – Т. 61. – № 2. – С. 3-66.
7. B.Sh. Kulpeshov. On Problem of Expressiveness of Database Queries // International Journal of Mathematics, Computer Sciences and Information Technology. – 2010. – Vol. 3. – No. 2. – P. 123-128.
8. B.Sh. Kulpeshov. To Reducibility of Database Queries over an Ordered Domain // Computer Modelling and New Technologies. – 2012. – Vol. 16. – No. 2. – P. 34-39.
9. B.Sh. Kulpeshov. On Reducibility of database queries over a circularly minimal domain // Advances in Computational Sciences and Technology. – 2013. – Vol. 6. – No. 1. – P. 25-33.
10. B.S. Baizhanov, B.Sh. Kulpeshov. On the Isolation Property over a Database Domain // Journal of Mathematics and System Science. – 2013. – Vol. 3. – No. 2. – P. 96-100.
11. H.D. Macpherson, D. Marker, Ch. Steinhorn. Weakly o-minimal structures and real closed fields // Transactions of the American Mathematical Society. – 2000. – Vol. 352. – P. 5435–5483.
12. B.Sh. Kulpeshov. Weakly o-minimal structures and some of their properties // The Journal of Symbolic Logic. – 1998. – Vol. 63. – P. 1511–1528.
13. B.S. Baizhanov. Expansion of a model of a weakly o-minimal theory by a family of unary predicates // The Journal of Symbolic Logic. – 2001. – Vol. 66. – P. 1382–1414.
14. K. Ikeda, A. Pillay, A. Tsuboi. On theories having three countable models // Mathematical Logic Quarterly. – 1998. – Vol. 44. – No. 2. – P. 161–166.
15. S.V. Sudoplatov. Classification of countable models of complete theories. — Part 1. — Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publishing House. — 2018. — ISBN 978-5-7782-3527-4. — 326 p.
16. M.G. Peretyat'kin. A theory with three countable models // Algebra and Logic. – 1980. – Vol. 19. – No. 2. – P. 139-147.

21. B.Sh. Kulpeshov, S.V. Sudoplatov. Linearly ordered theories which are nearly countably categorical // *Mathematical Notes*. – 2017. – Vol. 101. – No. 3. – P. 475–483.
22. A.B. Altayeva, B.Sh. Kulpeshov. Binariness of almost  $\omega$ -categorical quite o-minimal theories // *Siberian Mathematical Journal*. 2020. – Vol. 61. – No. 3. – P. 379-390.
23. B.Sh. Kulpeshov, T.S. Mustafin. Almost  $\omega$ -categorical weakly o-minimal theories of convexity rank 1 // *Siberian Mathematical Journal*. – 2021. – Vol. 62. – No. 1. – P. 52-65.

---

**Information about authors:**

1. Kulpeshov Beibut Shayikovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Kazakh-British Technical University, st. Tole bi 59  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4242-0463>  
Email: [b.kulpeshov@kbtu.kz](mailto:b.kulpeshov@kbtu.kz)
2. Mustafin Timur Salymovich – Lecturer, Kazakh-British Technical University, st. Tole bi 59  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9916-4168>  
Email: [t.mustafin@kbtu.kz](mailto:t.mustafin@kbtu.kz)

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ

**ТОЙГОЖИНОВА А.Ж., ШУЛЬЦ В.А., КУРИШБАЙ Н.А.**

*Казахская Академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева, 050000,  
Алматы, Казахстан*

**Аннотация.** В данной статье рассматривается управление автоматизированной системой нефтеперекачивающей станции и отслеживание неисправностей их технических показателей. Также рассмотрены основные математические формулы для безопасной транспортировки и подачи нефти. Управление основными действиями системы с помощью логического контроллера считается одной из основных ролей в нефтяной отрасли. Был сделан вывод о том, что формирование оптимального режима работы в автоматизированной системе управления агрегатами нефтеперекачивающей станции, а также минимизация неисправностей позволят снизить экономические издержки.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, нефтеперекачивающая станция, магистральный нефтепровод, насосный агрегат, дискретный и аналоговый модуль

## МҰНАЙ СОРҒЫ СТАНЦИЯСЫНЫҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН ҚҰРУ

**ТОЙГОЖИНОВА А.Ж., ШУЛЬЦ В.А., КУРИШБАЙ Н.А.**

*М.Тынышпаев атындағы Қазақ көлік және коммуникация академиясы, 050000, Алматы, Қазақстан*

**Аңдатпа.** Бұл мақалада мұнай айдау станциясының автоматтандырылған жүйесін басқару және олардың техникалық көрсеткіштерінің ақауларын бақылау қарастырылған. Сондай-ақ мұнайды қауіпсіз тасымалдау мен жеткізудің негізгі математикалық формулалары сарапталған. Жүйенің негізгі әрекеттерін логикалық контроллермен басқару мұнай саласындағы негізгі рөлдердің бірі болып саналады. Мұнай айдау станциясының автоматтандырылған басқару жүйесінде оңтайлы жұмыс режимін қалыптастыру, сондай-ақ ақауларды азайту экономикалық шығындарды кемітеді деген қорытынды жасалды.

**Түйінді сөздер:** автоматтандырылған басқару жүйесі, мұнай айдау станциясы, магистральды мұнай құбыры, сорғы агрегаты, дискретті және аналогты модулі.

## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR AN OIL PUMPING STATION

**TOYGOZHINOVA A.Zh., SHULTS V.A., KURISHBAY N.A.**

*Kazakh Academy of transport and communications named after M. Tynyshpayev, 050000,  
Almaty, Kazakhstan*

**Annotation:** This article discusses the management of the automated system of the oil pumping station and the monitoring of malfunctions of their technical indicators. The basic mathematical formulas for the safe transportation and supply of oil are also considered. Controlling the main actions of the system using a logic controller is considered one of the main roles in the oil industry. It was concluded that the formation of an optimal operating mode in the automated control system of the oil pumping station units, as well as the minimization of malfunctions, will reduce economic costs.

**Key words:** automated control system, oil pumping station, main oil pipeline, pumping unit, discrete and analog module

### Введение

В настоящее время функционирует и постоянно развивается сеть нефтепроводов различного ранга и назначения. Управление нефтяными потоками на ближайшее время чаще всего выполнялось через арматуру, фиксирующую производительность насосных установок на нефтетранспортных постах, что приводило к значительным потерям в регулирующих элементах, значительным потерям энергии в их результате.

Применение регулируемого электропривода в режиме регулирования производительности насосного агрегата создает условия для эффективного поддержания частоты вращения агрегата в соответствии с заданным давлением и отпуском. Имеется возможность подключения системы управления производительностью нефтетранспортного поста к системе автоматического управления всей магистралью.

Под современным нефтепроводом подразумевается комплекс сооружений, включающий линейную часть, главные и промежуточные насосные станции и конечные пункты. Самым сложным звеном магистрального нефтепровода является головная насосная станция, включающая промежуточную станцию и резервуарный парк.

Изменение объема нефти в результате периодических и годовых колебаний добычи нефти, появление нестационарных процессов в нефтепроводах, которые зависят от различных технологических операций и колебаний физических параметров перекачиваемой нефти, а также аварийные и ремонтные работы приводят к изменению режимов работы станций. В некоторых случаях эти изменения приводят к аварийной остановке нефтеперекачивающих станций и другим негативным ситуациям, которые в конечном итоге несут многочисленные экономические потери. Поэтому на всех участках транспортировки необходимо обеспечить соответствующую бесперебойность работы станций, а также защиту нефтепровода и устройств [1].

Вместе с тем необходимо обосновать и

проанализировать стохастические модели технологического процесса транспортировки нефти по магистральному нефтепроводу в смысле неполной информации о взаимосвязи и взаимодействии, что все параметры модели неизвестны и все условия среды не могут быть реализованы. Такой анализ полезен для определения работы многих нестационарных технологических объектов с магистральными нефтепроводными подстанциями.

Повышение эффективности транспортировки и перекачки нефти, повышение безаварийности работы и надежности технологических устройств, надежность обработки информации и оперативное решение являются одними из главных вопросов в народном хозяйстве. Для создания таких автоматических систем необходимо внедрение централизованной структуры.

Актуальность работы заключается в повышении безопасности технологического процесса нефтеперекачивающей станции.

Разработка нефтяных месторождений характеризуется безводным извлечением нефти из скважин. Однако в каждом нефтяном месторождении начинается период выхода воды в малых, а затем и в увеличивающихся количествах. 60-75% нефти перерабатывается в увлажненном виде.

Пластовые воды, выходящие из скважин на различных месторождениях, могут существенно отличаться по концентрации и составу растворенных в них минеральных солей, по количеству газа и наличию микроорганизмов. При увеличении пластовой смеси нефти с водой образуется эмульсия, которую следует рассматривать как механическую смесь нефти и воды двух нерастворимых жидкостей, формирующихся в виде капель, одна на территории другой которых имеет разные формы.

Наличие воды в нефти приводит к удорожанию транспортировки, что связано с ростом объемов транспортируемой жидкости и увеличением ее вязкости. Даже при наличии в нефти 0,1% воды приводит к вспениванию нефти в ректификационных колоннах нефтеперерабатывающих заво-

дов, что нарушает технологические режимы переработки, а также загрязняет конденсационную аппаратуру.

Качество обрабатываемой продукции в большей степени зависит от качества сырья, то есть нефти. Если раньше на технологических установках нефтеперерабатывающих заводов использовалось 100 500 миллиграммов нефти с минеральными солями в литре, то сейчас требуется более глубокая обессоленная нефть, и зачастую перед переработкой нефти приходится полностью отделять от нее соли [2].

Наличие в нефти песчаных и иловых частиц механических примесей приводит к абразивному износу трубопроводов, нефте-транспортного оборудования, затрудняет нефтепереработку, повышает зольность мазутов и гудронов, приводит к образованию заломов в холодильниках, печах и теплообменниках, что приводит к снижению коэффициента теплоотдачи и скорейшему выходу их из строя. Механические примеси приводят к образованию форсированных эмульсий.

Наличие минеральных солей в нефти в виде кристаллов и в виде растворов в воде приводит к усиленной коррозии металлов на нефтеперерабатывающем и нефтетранспортном оборудовании и трубопроводах, повышает стабильность эмульсий, затрудняет переработку нефти.

Вышеперечисленные причины объясняют необходимость подготовки нефти к транспортировке. В основном подготовка нефти включает в себя ее обезвоживание и обессоливание и полную или частичную дегазацию.

Гидравлическая машина, которая при подаче энергии на насосы начинает перемещать жидкость под давлением в другое место, называется насосом. Комплект насоса с электроприводом и передаточным механизмом (муфтой, редуктором, шкивом) образует насосный агрегат. Комплекс оборудования, обеспечивающий функционирование насосов в нужном порядке и состоящий из одного или более насосных агрегатов, трубопроводов, запорной и регулирующей арматуры, контрольно-измерительной аппаратуры и

аппаратуры управления и защиты, составляет насосную установку. Здание, в состав которого входят одно или более насосных установок, вспомогательные системы и оборудование, бытовые и производственные помещения, обеспечивающие работоспособность объекта в целом, называется насосным постом.

Современная наука о насосах делит их по принципу действия на три основные группы: лопаточные, или лопатообразные (циркуляционные насосы), вихревые (тяговые насосы) и объемные (вытеснительные насосы).

В лопатных насосах преобразование энергии осуществляется в процессе циркуляции лопастей колес и их силового воздействия на поток.

Лопатные насосы делятся на центробежные (гребные), диагональные и осевые (пропеллерные). Центробежные насосы перемещают жидкость в рабочем колесе в направлении от центральной части наружу, т.е. в потоке жидких частиц отсутствуют осевые составляющие абсолютной скорости. Центробежные насосы имеют меньшую всасывающую способность. Поэтому при их включении во всасывающую трубу и поверх рабочего колеса наливается жидкость с помощью различных методов. Лопатные насосы удобны для прямого подключения с современными электромоторами, паровые и газовые турбины с двигателями внутреннего сгорания. Лопатные насосы отличаются компактностью и легкостью.

КПД лопатных насосов достигает значений 0,95-0,98, и в зоне средних давлений КПД поршневых насосов оказывается не ниже. Поэтому при низких и средних давлениях применяются только лопатные насосы. Так как в настоящее время усовершенствованы методы проектирования и производства лопатных насосов, лопатные насосы стали использоваться и при высоких давлениях. Центробежные насосы, в том числе лопатные, находят широкое применение в нефтехимии для подачи высокоагрессивных и токсичных жидкостей при подаче нефти и нефтепродуктов по трубопроводам, для

подачи воды в нефтепластик при добыче нефти [3,4].

**Основная часть**

Основные параметры насосов. Основными параметрами насосов являются подача, давление, мощность и коэффициент скорости.

Отправление. Фактическим расходом насоса называется количество жидкости, проходящей через напорный патрубок в единицу времени. Пересылка может подаваться в единицах объемного или весового потребления. Объемное потребление измеряется  $Q$  м<sup>3</sup>/с или л/с, а весовое потребление  $G$  кг/с. Весовое потребление  $G$  должно быть связано с объемным потреблением  $G = \rho Q$ , где  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Теоретическая подача насоса ( $Q_T, GT$ ) называется количеством жидкости, перекачиваемой рабочими органами насоса во внутренних его каналах в единицу времени. Отношение фактического отпуски  $Q$  насоса к теоретическому отпуску  $Q_T$  определяет объемный КПД насоса, то есть:

$$\eta_0 = \frac{Q}{Q_T} \tag{1}$$

$Q$  измеряет отправку фактического объема измерителями, объемными счетчиками.

Давление насоса. Под давлением насоса  $H$  понимается приращение механической энергии, которое несет жидкость, проходящая через насос; давление насоса представляет собой разность давлений на входе и выходе насоса, и измеряется в метрах от колонны транспортируемой жидкости. Таким образом, давление насоса можно записать по следующей формуле:

$$H = H_H - H_B = \frac{P_H - P_B}{\rho g} + (z_H - z_B) + \frac{v_H^2 - v_B^2}{2g}, \tag{2}$$

где  $P_H, z_H, v_H$  – давление, обозначение и скорость потока на стороне нагнетания;  $P_B, z_B, v_B$  – параметры на входе насоса.

Мощность. Потребляемая мощность  $P$  насоса измеряется в ваттах и киловатах. Для его определения необходимо, чтобы была известна полезная мощность  $P_m$ :

$$P_m = \frac{Q \rho g H}{102} \tag{3}$$

Отношение полезной мощности  $P_m$  к

потребляемой мощности  $P$  определяет общий коэффициент полезного действия насоса  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P_m}{P} \tag{4}$$

Потребляемая мощность  $P$  определяется по формуле:

$$P = \frac{Q \rho g H}{102 \eta} \tag{5}$$

Коэффициент скорости. Коэффициент скорости считается относительной характеристикой лопастного насоса. Он описывает конструктивные особенности серии аналогичных насосов, и позволяет выбирать насосы для работы в заданных условиях, используя уравнения подобия. Под коэффициентом скорости  $n_s$  или относительной частотой вращения понимается частота вращения насоса, потребляющего мощность 0,736 кВт при достижении давления 1 метр. Используя уравнения теории подобия, можно получить следующую формулу:

$$n_s = 3.65 n \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \tag{6}$$

При заданной частоте вращения  $n$  коэффициент скорости  $n_s$  увеличивается по мере увеличения производительности  $Q$  и давления  $H$ .

На нефтяных месторождениях для транспортировки нефти и нефтяных эмульсий применяются в основном центробежные и поршневые насосы.

В центробежных насосах движение жидкости осуществляется в результате действия центробежных сил, возникающих при вращении жидкости рабочими колесами. Рабочее колесо с лопастями, установленными на валу, вращается внутри корпуса, вместе с жидким колесом, поступающим в центр колеса с всасывающим патрубком, с центробежной силой выбрасывается наружу, и нагнетатель выходит через патрубок. Центробежные насосы подразделяются на одноступенчатые и многоступенчатые насосы. В многоступенчатых насосах каждая из предстоящих ступеней работает на приемную последующей ступени, за счет чего давление насоса увеличивается.

В нефтяной промышленности часто используются одноступенчатые и много-

ступенчатые центробежные насосы секционного типа НД и НК.

Если один насос не может обеспечить необходимую подачу или давление, применяется параллельное или последовательное соединение нескольких насосов. Очень распространено параллельное соединение нескольких центробежных насосов, которые втягивают нефть в одну трубу.

Центробежные насосы имеют следующие преимущества: малые габариты, относительно низкая цена, отсутствие клапанов и дублирующих форсированных деталей, возможность прямого подключения к высокоскоростным двигателям, возможность перекачки нефти с механическими примесями, удобство автоматизации насосных станций, оборудованных центробежными насосами.

При выборе двигателя для центробежного насоса следует обращать внимание на частоту вращения двигателя, так как в центробежных насосах мощность, давление, производительность и частота вращения связаны следующими уравнениями:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \quad (7)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}, \quad (8)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (9)$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}, \quad (10)$$

где М - крутящий момент двигателя.

Насосы для трубопроводной транспортировки нефти и нефтепродуктов могут работать под давлением 6-7 МН/м<sup>2</sup>. Величина давления определяется допуском труб. В зависимости от диаметра трубопровода пропуск насосов составляет 0,0278-1,15 м<sup>3</sup>/с (100-4000 м<sup>3</sup>/ч). Расстояние подачи одного насосного поста составляет 100 км и более. Для транспортировки сырой нефти среди предприятий применяются насосы с малой подачей [5].

Наиболее экономной установкой для магистральных нефтепроводов является агрегат, состоящий из двух или трех насосов.

Основные технические данные наиболее распространенных центробежных насосов приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Технические данные центробежных насосов**

Марка насоса	Отпуск м <sup>3</sup> /ч	Давление, м	Электрическая мощность, кВт	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Масса, кг
Одноступенчатые регулирующие насосы					
1,5-К	6-14	20	2,2	2900	60,5
2К-6	10-30	34	4	2900	78
3К-6	45	54	20	2900	301
3К-9	30-54	34	7	2900	141
4К-6	90	87	55	2900	496
Насосы типа НК					
НК-	65-35	7	13	3000	200
НК-	200-	7	35	3000	100
НК-	560-	7	10	3000	200
Многоступенчатые секционные насосы типа МС					
3МС-	34	46	7	1950	185
3МС-	34	69	10	2950	213
3МС-	34	92	14	2950	241
3МС-	34	115	17	2950	269
4МС-	60	66	17	2950	220
4МС-	60	99	25	2950	254
4МС-	60	132	33	2950	280
4МС-	60	165	42	2950	324
Многоступенчатые нефтяные насосы					
8НД-	150	95	29	1500	1837
8НД-	200	210	45	1500	3370

8НД-	300	420	50	2950	3492
8МБ-	400	300	40	3000	1875
14Н-	1100	370	54	3000	4900

В настоящее время использование регулируемого электропривода для оперативного управления режимами работы центробежных насосов из центра нефтетранспортных постов растет день ото дня. Внедрение регулируемого по частоте вращения насосного электропривода позволяет снизить расходную мощность до половины заданной мощности в зависимости от технологических параметров нефтетранспортных станций. Применение регулируемого электропривода в порядке регулирования производительности насосного агрегата создает условия для эффективного поддержания частоты вращения агрегата в соответствии с подаваемым давлением и отпуском [6]. Имеется возможность подключения системы управления производительностью нефтепроводного поста к системе автоматического управления всей магистрали. В нефтяной промышленности чаще всего применяются центробежные насосы одно и многоступенчатые, а также секционные центробежные насосы типа НК.

Насосная станция характеризуется как сложный электрогидравлический технический комплекс зданий и оборудования, включающий процесс преобразования электрической энергии потока жидкости в механическую и, соответственно, управление параметрами транспортируемой жидкости [7].

Насосные станции находят масштабное применение в хозяйстве, производстве. Они характеризуют большое разнообразие функций, схему подключения насосов при совместной работе, регулируемые параметры, группы надежности и другие показатели.

По способу подключения насосов насосная станция выражается в индивидуальной работе насосов и совместной работе насосов. Первый способ характеризуется малой мощностью насоса для насосной станции и низкими требованиями к надежности работы, например для дренажного насоса.

И насосы, работающие вместе, насосная

станция широко используется для всех типов. Также для обеспечения необходимых технологических показателей используется параллельное, последовательное и комбинированное соединение устройств. Особенно при параллельном соединении насосов используется большое количество насосных станций теплоснабжения.

Последовательное соединение производится только в том случае, если требуется высокое давление. Насосную станцию по регулируемым параметрам можно разделить на станцию регулирования давления и станцию регулирования подачи.

Насосная станция используется для параллельного соединения насосов с приоритетным использованием, а также водозащиты в системах водоснабжения и зон размещения людей, систем наружного водоснабжения технологических комплексов промышленных предприятий, производственных объектов, в том числе на предприятиях цветной металлургии и нефтеперерабатывающих заводах.

Важным элементом насосной станции является насосная установка с одним или несколькими насосами, система всасывания и нагнетания труб, запорный инструмент, ходовая линия, а также измерительные технологические параметры других установок.

В качестве основного силового оборудования на насосной станции используются объемные или динамические насосы.

Насосная станция после первичной перегонки нефти обеспечивает ее приток в установки дальнейшего технологического цикла и поддержание в ней необходимого давления [8,9].

Перекачка нефти в насосы производится через фильтры, устанавливаемые на всасывающей и вытяжной магистралях этой системы. Станция всегда оборудована рабочими и резервными насосами. Включение в работу каждого из насосов или одного из фильтров в вытяжной магистрали производится с помощью устройств, управляемых системой

автоматики. Система автоматизации управления работой насосной станции давления воды не только обеспечивает поддержание заданного давления масла в выпускной магистрали, но и в случае выхода рабочего

насоса из строя или засорения одного из рабочих фильтров производит своевременную замену рабочей линии на резервную систему [10].

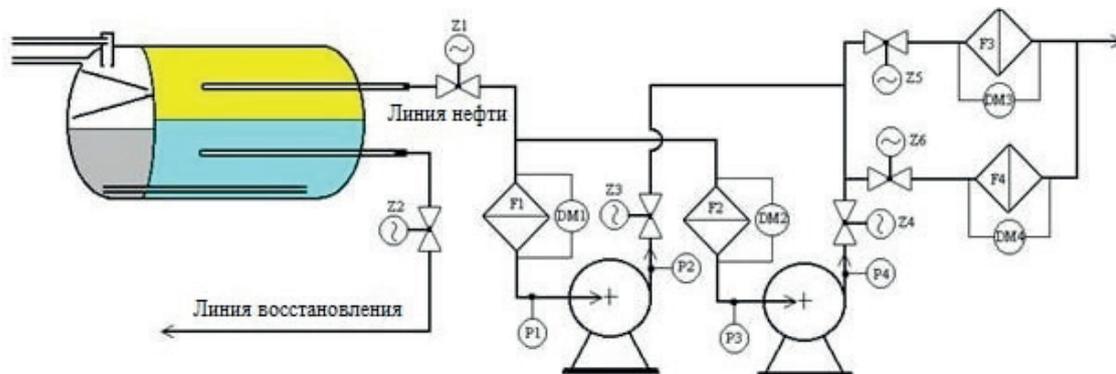


Рис. 1 – Технологическая схема работы насосной станции

Для контроля рабочих параметров в технологической цепи насосной станции используют следующие технические средства:

- DM1-DM4 – дифференциальные манометры;
- P1, P3 – датчики давления на входе насосов;

- P2, P4 – датчики давления на выходе насосов;
- Z1-Z6 – приводы задвижек и датчики их положения;
- F1-F4 – фильтры нефтяной сети.



Рис. 2 – Структура системы управления насосной станцией низкого давления

Данная аппаратура подключается к соответствующим портам контроллера системы управления вытяжной насосной станцией (рис. 2).

К дискретному модулю (порту) ввода данного контроллера подключены датчики положения кнопок управления и защелок, как и в предыдущем случае. К входу аналогового

модуля ввода (порта) подключены аналоговые датчики давления и дифференциальные манометры. Двигатели всех задвижек и приводы насосов подключены к дискретному выходному модулю (порту).

**Выводы**

В настоящее время значительная доля нефти и нефтепродуктов транспортируется

по магистральным трубопроводам. В связи с этим особое внимание было уделено повышению эффективности перевозок.

Транспортировка нефти и нефтепродуктов, природных или искусственных газов из начальной точки трубопровода в конечную

точку по магистральному нефтепроводу, т. е. доставка от места переработки к потребителю.

Основные пусковые источники транспортируемого продукта находятся в начальной и конечной точках трубопровода и находятся там, где находятся потребители.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б.С. Лезнов. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. – М: Энергatomиздат, 2006. – 361 с.
2. В.З. Ковалев, Е.Г. Бородацкий. Эффективное использование энергии насосных установках нефтеперекачивающих станций. Промышленная энергетика. – 2000. – № 1. – 2-3 с.
3. О.В. Крюков, А.В. Серебряков. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов. // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – №4 (29). – С. 35-38.
4. Г.Е. Васильев, А.А. Коробков. Трубопроводный транспорт нефти./ Под редакцией С.М. Вайнштока: Учебник для вузов: В 2т. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2002. – Т.1. – 407 с.
5. А.А. Прокопов, Т.Т. Тигист. Математические модели сложных неоднородных распределенных систем перекачки жидкости. //С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т ЛЭТИ. – СПб, 2003. – 13 с.
6. Б.Т. Жумагулов, Ш.С. Смагулов, А.У. Евсеева, Л.А. Нестеренкова. Трубопроводный транспорт высоковязких и высокозастывающих нефтей. – Алматы: НИЦ «Галым», 2002.
7. О.П. Шишкин. Автоматизированные системы управления предприятия нефтяной промышленности. – М: Энергоиздат, 1990.
8. В.Б. Яковлев. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов/ Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х. Под редакцией Яковлева В.Б. – М.: Высш. шк., 2005. – 567 с.
9. А.А. Ерофеев. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. – Спб.: Политехника, – 2005. – 302 с.
10. Альбратрос. Настоящая промышленная автоматизация. Каталог продукции, 2015. – 314 с.

## REFERENCES

1. B.S. Leznov. Energoberezhniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh. – M.Energatomizdat. 2006. – 361 s.
2. V. Z. Kovalev. E. G. Borodatskiy. Effektivnoye ispolzovaniye energii nasosnykh ustanovkakh nefteperekachivayushchikh stantsiy. Promyshlennaya energetika. 2000. № 1. – 2-3 s.
3. Kryukov O.V., A.V. Serebryakov. Metod i sistema prinyatiya resheniy po prognozirovaniyu tekhnicheskogo sostoyaniya elektroprivodnykh gazoperekachivayushchikh agregatov. // Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. 2015. №4 (29). S. 35-38.
4. G.E. Vasilyev, A.A. Korobkov. Truboprovodnyy transport nefiti./ Pod redaktsiyey S.M. Vaynshtoka: Uchebnik dlya vuzov: V 2t. – M.: ООО «Nedra – Biznestsentr». 2002. – T.1. – 407 s.
5. A.A. Prokopov, T.T. Tigist. Matematicheskiye modeli slozhnykh neodnorodnykh raspredelennykh sistem perekachki zhidkosti. //S.-Peterburg. gos. elektrotekhn. un-t LETI. – SPb. 2003. – 13 s.
6. B.T. Zhumagulov. Sh.S. Smagulov. A.U. Evseyeva. L.A. Nesterenkova Truboprovodnyy transport vysokovyazkikh i vysokozastyvayushchikh neftey. – Almaty: NITs «Galym». 2002.
7. O.P. Shishkin. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya predpriyatiya neftyanoy promyshlennosti. - M: Energoizdat. 1990.

8. V.B. Yakovlev. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Ucheb. dlya vuzov/ S.E. Dushin, N.S. Zotov, D.Kh. Imayev; Pod redaktsiyey V.B. Yakovleva. - M.: Vyssh. shk.. 2005. 567 s.
9. A.A. Brofeyev. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik dlya vuzov. - Spb.: Politekhnik. 2005. 302 s.
10. Albratros. Nastoyashchaya promyshlennaya avtomatizatsiya. Katalog produktsii 2015. – 314 s.

---

**Information about authors:**

1. Toygozhinova A.Zh. – Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev  
Email: [nurbol.algabek@mail.ru](mailto:nurbol.algabek@mail.ru)
2. Shults V.A. – Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev
3. Kurishbay N.A. – Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev

**МИКРО ЖЕЛІДЕ МУЛЬТИАГЕНТТІ ЖҮЙЕЛЕРДІ ҚОЛДАНУҒА ШОЛУ****ТОЛЕГЕНОВА Г., ЖУКАБАЕВА Т., ЗАКИРОВА А., АБДИЛДАЕВА А.***Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан*

**Аңдатпа.** Соңғы уақыттарда бірнеше агенттерге негізделген ақылды желілік қосымшаларға көп көңіл бөлініп келеді. Мультиагенттік жүйе ретінде бір-бірімен ақпарат алмасуды жүзеге асыра алатын және белгілі бір жолмен қоршаған ортамен өзара әрекеттесетін белгілі бір ортаға орналастырылған бағдарламалық жасақтаманың немесе физикалық құрылғылар бірліктерінің (нысандарының) жиынтығы түсіндіріледі. Сонымен қатар мульти-агентті жүйенің компоненттері келесі қасиеттерге ие: олар автономды, орталықтандырылмаған принцип бойынша басқарылады және қоршаған ортаның шектеулі бөлігінен ғана ақпарат ала алады. Микро желілер мультиагентті жүйелерді тиімді қолдануға болатын жүйенің типтік мысалы болып келеді. Бұл жұмыста микро желіде мультиагентті жүйені қолдану ұсынылған. Сонымен қатар тұжырымдамалар, көп агентті жүйенің архитектурасы, басқарудың төрт стратегиясы бойынша жіктелген микро желіні басқарудың әртүрлі аспектілеріне жан-жақты шолу қарастырылады.

**Түйінді сөздер:** Smart grid, микро желі, орталықтандырылған микро желі, орталықтандырылмаған микро желі, мультиагенттік жүйе.

**ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ В МИКРОСЕТИ****ТОЛЕГЕНОВА Г., ЖУКАБАЕВА Т., ЗАКИРОВА А., АБДИЛДАЕВА А.***Казахстанско-Британский технический университет, 050000, Алматы, Казахстан*

**Аннотация.** В последнее время большое внимание уделяется приложениям интеллектуальных сетей на основе нескольких агентов. Подмультиагентной системой понимается набор единиц (сущностей) программного обеспечения или физических устройств, которые помещены в некую среду, в которой они могут осуществлять информационный обмен друг с другом и взаимодействовать определенным образом со средой. При этом компоненты мультиагентной системы обладают следующими свойствами: они автономны, управляются по децентрализованному принципу и могут получать информацию лишь из ограниченной части окружающей среды. Микросети являются типичным примером системы, в которой могут быть эффективно применены мультиагентные системы. В данной работе представлено применение мультиагентной системы в микросети. Кроме того, будут рассмотрены концепции, архитектуры мультиагентной системы, всесторонний обзор различных аспектов управления микросети, которые в целом классифицируются по четырем стратегиям управления: централизованная, децентрализованная, распределенная и иерархическая.

**Ключевые слова:** интеллектуальная сеть, микросеть, централизованная микросеть, децентрализованная микросеть, управление энергоэффективностью, мультиагентная система.

**REVIEW OF MULTIAGENTS SYSTEMS APPLICATION  
IN MICROGRIDS****TOLEGENOVA G., ZHUKABAEVA T., ZAKIROVA A., ABDILDAEVA A.***Kazakh-British technical university, 050000, Almaty, Kazakhstan*

**Abstract.** Recently, a lot of attention has been paid to smart network applications based on multi -agents. A multi-agent system is a set of units (entities) of software or physical devices that are placed in a certain

environment in which they can exchange information with each other and interact in a certain way with the environment. At the same time, the components of a multi-agent system have the following properties: they are Autonomous, run on a decentralized basis, and can only receive information from a limited part of the environment. Micro grid networks are a typical example of a system in which multi-agent systems can be effectively applied. This paper presents the application of a multi-agent system in a micro grid. In addition, concepts, multi-agent system architectures, and a comprehensive overview of various aspects of micro grid management will be considered, which are generally classified into four management strategies: centralized, decentralized, distributed, and hierarchical.

**Keywords:** Smartgrid, microgrid, centralized microgrid, decentralized microgrid, multi-agent system

### Кіріспе

Біздің елімізде цифрлық технологиялардың дамуы ақпараттық-коммуникациялық қызметтердің әлемдік нарықтағы рөлін күшейту және ақпараттық индустрияның бәсекеге қабілеттілігін арттыру және еліміздің экономикасын жаңғырту үшін ақпараттық қызметтерді өндіретін және экспорттайтын отандық кәсіпорындар мен компанияларға қолдау көрсету сияқты жағдайлар мен факторлармен анықталады. Қазақстанның Үкіметі мен мемлекеттік органдары ұзақ мерзімді экономикалық өсуді айқындауда қоғамды ақпараттандырудың және цифрлық технологияларды дамытудың маңыздылығын сезіне отырып, мемлекеттік саясаттың түйінді бағыттарының бірі ретінде осы саланы дамытуға белсенді қатысады.

Сондықтан бүгін қазақстандық кәсіпорындардың алдына "Индустрия 4.0" шеңберінде цифрлық жаңғырту рельстеріне көшу міндеті қойылды»[1].

Энергетикадағы негізгі әлемдік тренд желінің барлық элементтері мен қатысушылары арасында тиімді ақпарат алмасуды қамтамасыз ету, ірі іркілістерден, табиғи катаклизмдерден, сыртқы қатерлерден қорғау және өзін-өзі қалпына келтіру мақсатында әртүрлі Smart технологияларды енгізу болып табылады.

Электр энергетикасы саласының нысаналы жай-күйі энергетикалық жүйелердің одан әрі интеллектуализациясымен (Smart Grid) сипатталады. Интеллектуалды энергия жүйесі тұрақты, бейімделгіш, экономикалық тиімді, сенімді және қауіпсіз электрмен жабдықтауды қамтамасыз ету мақсатында өзінің барлық элементтерін басқару қабілетіне ие.

Микро желі – бұл интеллектуалды желінің құрылыс блогы және әдетте тұтынушы жағында орналасқан төмен вольтты желіні, сақтау жүйесін, басқару блоктарын және жел энергиясын, күн энергиясын, отын элементтерін, микротурбиналарды және гидроэлектростанцияларды қамтитын электр жүйелерінің заманауи түрі [2]. Дамушы елдерде Smart Grid интеллектуалды жүйесі микро желілерден тұратын тиімді және сенімді энергияны қамтамасыз етуге бағытталған микро желіні кеңінен дамыту мүмкіндігі бар. Бұл микро желі Smart Grid интеллектуалды жүйесінің ішкі ұяшығын білдіреді. Осылайша интеллектуалды жүйені басқару әртүрлі микро желілерді дәйекті түрде басқаруға алып келеді [3].

Бұл өте күрделі жүйені құру үшін байланыс жүйелері, сондай-ақ электр энергиясын өндіру және тұтынушылық сұраныс процестерін бақылауға арналған арнайы электроника қажет.



1-сурет. Smart Grid интеллектуалды жүйесінің компоненттері мен технологиялары [3].

Smart Grid интеллектуалды жүйесінің міндеттерінің бірі ақпараттық-комму-

никациялық технологиялардың ішкі жүйесін іске асыру болып табылады, ол энергия менеджментінің компонентіне энергияны өндіруге, таратуға және тұтынуға байланысты істеріне жауап беру үшін әртүрлі ішкі жүйелерді басқару бойынша автономды іс-қимылдарды бір уақытта жүзеге асыра отырып, электр энергиясын жеткізу туралы тиімді шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді [3].

Интеллектуалды желі қазіргі электр желісіндегі зондтау, басқару және байланыс протоколы саласындағы алдыңғы қатарлы технологияларды жеткізу деңгейінде де, тарату деңгейінде де біріктіреді. Ол сонымен қатар келесі буынның энергетикалық жүйесі ретінде қарастырылады. Микро желі қолданыстағы энергетикалық инфрақұрылымды толықтыратын маңызды инновацияға айналды. Бұл тағы бір микро көзді, энергияны сақтау элементтерін (қайта зарядталатын батарея) және жүктемелерді қолдануды қамтиды. Микро желілер одан әрі басқару архитектурасына, жүйеде барлық негізгі компоненттерді – орталықтандырылған және орталықтандырылмаған микро желіні байланыстыру үшін қолданылатын коммуникациялық технологияларға сәйкес екі түрге бөлінді.

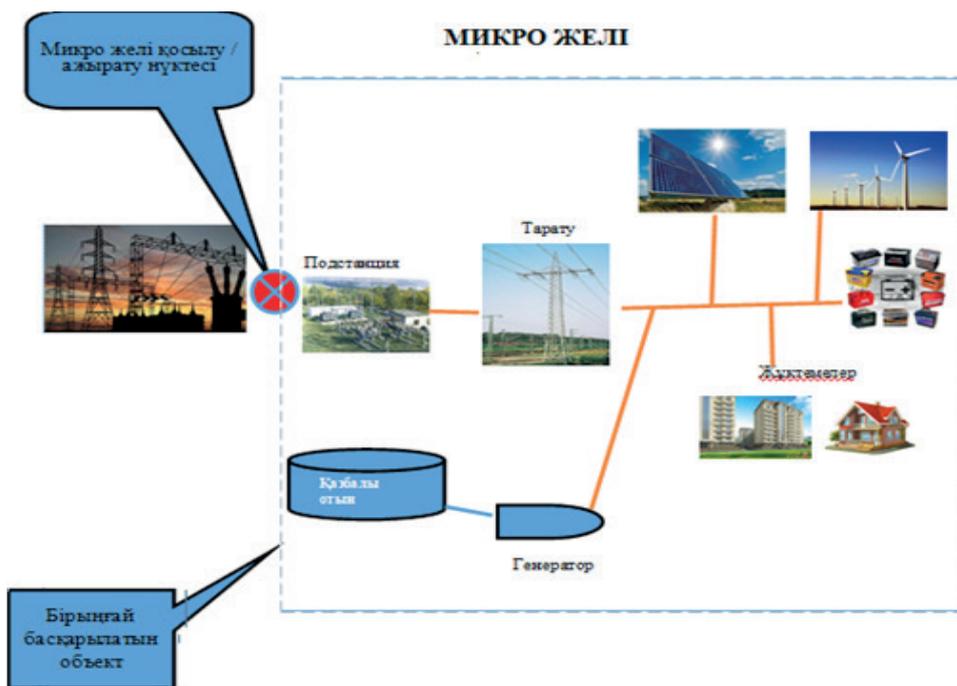
### **Микро желілер архитектурасы**

Микро желілер жаңартылатын энергия көздерін дамытуға және оларды қолданыстағы электр желілеріне біріктіруге ықпал ететін негізгі технологияға айналды. Бұл жүйелер бірнеше мәселелерді шешіп, ғимараттардың энергия тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Микро желі – шағын модульдік генераторларды төмен вольтты тарату жүйелерімен қосу арқылы қалыптасатын электр жүйесінің жаңа түрі. Микро желі басқа компоненттер арасында бірнеше энергия өндіру

жүйелерін, энергияны үнемдеу жүйесін, энергияны басқару жүйесін, байланыс жүйесін және басқару жүйесін қамтуы мүмкін. Осылайша микро желі тор деңгейінің біртұтас мәні ретінде жергілікті генерациялар мен жүктемелерді басқару шешімін ұсынады. Тек микро желі энергия жүйесінің тиімділігін, электр энергиясының сапасын және сыни жүктемелер кезінде тұрақты энергетикалық кепілдікті арттыру әлеуетіне ие. Сонымен қатар микро желінің тағы бір ерекшелігі – оның автономды болу мүмкіндігі. Бұл дегеніміз микро желінің желіге қосылу режимінде де, автономды режимінде де жұмыс істеуі үшін желіге қосыла және өшіре алатындығын білдіреді. Сондықтан микро желінің маңызды ерекшелігі, оның басқа таратылған буындарды басқару қабілеттілігі болып табылады [3].

Микро желілердің архитектурасы 2 суретте көрсетілген, бұл жерде анықтамаға сәйкес бөлінген ресурстар (сақтау және генерация), жүктемелер және басқарылатын жүктемелер көрсетілген. Ол жалпы байланыс нүктелері ретінде анықталатын электрлік шекараларын айқындайды. Бұл нүктелер басқа желілермен байланыс болып табылады. Микро желілер мен сыртқы торлардың кернеу сипаты әртүрлі болуы мүмкін. Мұндай жағдайда өзара байланысты қамтамасыз ету үшін микро желінің бөлігі болып табылатын интерфейс элементі орнатылуы керек. Орталықтандырылған немесе орталықтандырылмаған басқару жүйесі біртұтас басқарылатын жүйе ретінде жұмыс істеуге жағдай тудырады. Микро желі айнымалы, тұрақты немесе аралас айнымалы/тұрақты ток режимінде жұмыс істей алады. Осы технологияларға байланысты таратылған ресурстар мен жүктемелерді микро желілермен байланыстыру үшін қуатты электроника немесе трансформаторларды пайдалану керек.



2-сурет. Микро желі архитектурасы [4]

### Орталықтандырылған және орталықтандырылмаған микро желілер

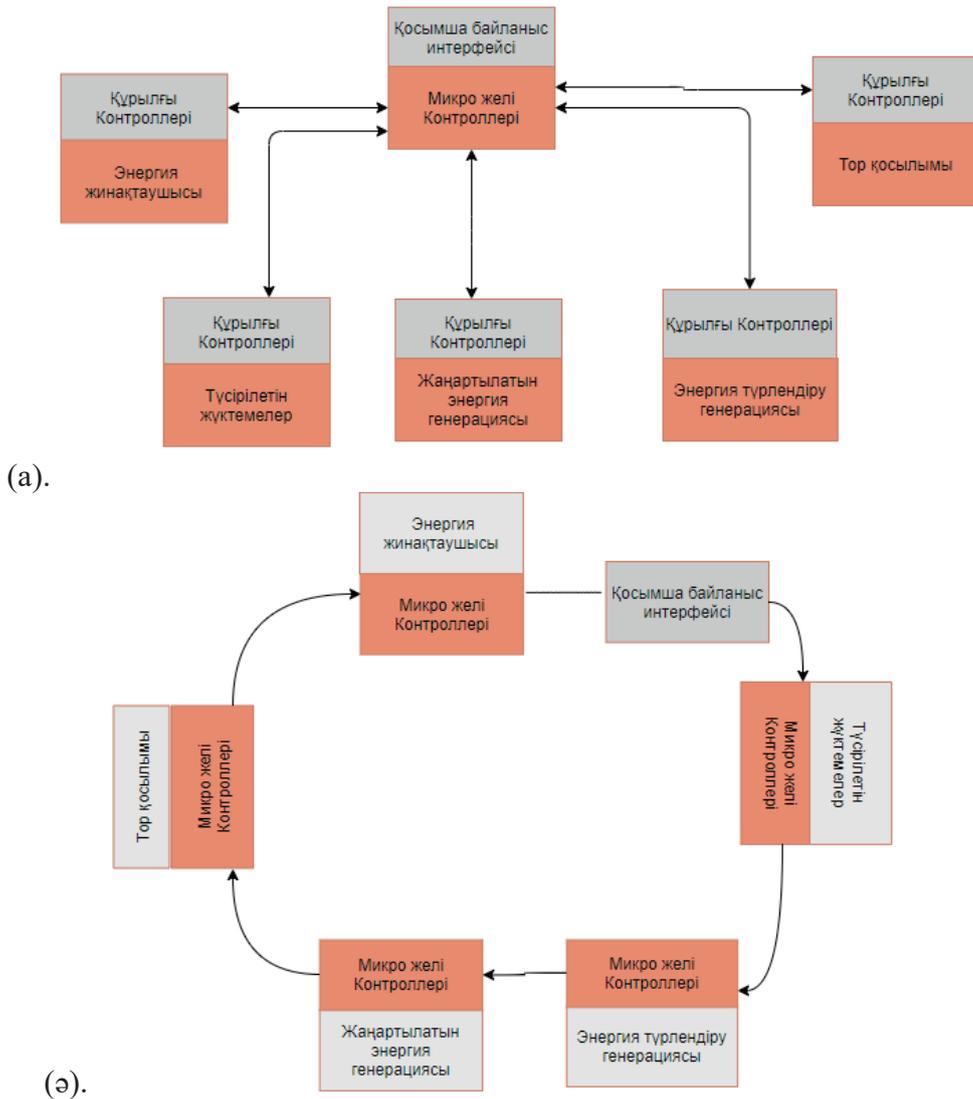
Өзара байланысқан микро желілерді басқарудың көптеген модельдері бар. Орталықтандырылған энергия менеджменті жүйесі – микро желілердің бірі. Модельде микро желілер туралы барлық тиісті ақпарат бірыңғай энергия менеджменті жүйесінің иелігінде, сондықтан энергия менеджменті жүйесіндегі ақаулық бүкіл микро желілерге әсер етеді. Бұған бәсекелес модель орталықтандырылмаған энергия менеджменті жүйесі деп аталады. Бұл модельде әр микро тор өзін бөлек жоспарлайды және басқа микро желілер туралы хабардар болмайды. Аталған бөлімде негізгі айырмашылықтар, артықшылықтар, топология/құрылым және микрожүйедегі ең жаңа технологиялар көрсетілген.

Орталықтандырылған микро желі моделінде микро желі туралы барлық мәліметтер (өсу жылдамдығының бірліктері, минималды көтеру уақыты, минималды жұмыс уақыты, заряд пен разрядты сақтау, жүктеме түрі және т.б.) энергияны басқару жүйесінің иелігінде. Ал орталық барлық жіберілген мәліметтер мен мақсатты функцияға сүйене отырып, бөлімшелердің қызметін бір күн

бұрын жоспарлайды. Осы оңтайландыру процедурасы сенімділікті арттыруға, шығындарды азайтуға және т. б. бағытталуы мүмкін.

Орталықтандырылмаған микро желі моделінде әр микро желі өзінің пайдасын бұрынша арттыру үшін тиісті басқару блоктарын бөлек басқарады, яғни режимде микро желілер тарату желісінің операторымен тікелей байланыста болады және прокси агенті жоқтың қасы. Орталықтандырылмаған жүйелер контроллердің негізгі ақауларын сәтсіздік болған түйіннен оқшаулаудың артықшылығы бар. Түйіндер тәуелсіз және бір контроллерге тәуелсіз болғандықтан, бұл жүйелер сенімді және оңай жаңартылады.

3-суретте орталықтандырылған және орталықтандырылмаған микро желі моделі көрсетілген. Энергияны басқарудың орталықтандырылған моделінде тек бір оңтайландыру энергияны басқару жүйесімен жүзеге асырылады, ал микро желі желіге модельдің жалпы шинасы арқылы қосылады, әр микро желі бөлек оңтайландырумен жүзеге асырылады және микро желі торға тікелей қосылады. Орталықтандырылмаған модельде әр микро желі бөлек оңтайландыру арқылы жүзеге асырылады және микро желі торға тікелей қосылады [5].



3 сурет. а) Орталықтандырылған және ә) орталықтандырылмаған микро желілер [6].

Бұрын электр жүйелерін орталықтандырылған басқару әдістері өте кең таралған еді. Олар нақты, өйткені тор шектеулі басқарылатын және бақылаушы құрылғыларға арналған болатын. Электр энергиясын тұтыну қажеттілігі өскен сайын жүйе күрделене түсті. Орталық басқару жүйесі сан қырлы және қымбат.

Орталықтандырылған және орталықтандырылмаған микро желінің басты айырмашылығы олардың басқару архитектурасында ғана емес, сонымен қатар басқа да маңызды функциялары бар: олар микрожүйенің негізгі компоненттері өзара әрекеттесетін байланыс. Қазіргі уақытта орталықтандырылған және орталықтандырылмаған жүйелер микрожүйенің

жұмысына жарамды, бірақ орталықтандырылмаған әдістер анағұрлым қолайлы; оның микрожүйелерде үздіксіз жұмыс істеу мүмкіндігі бар және шеткі байланыстың шектеулі қажеттілігі бар энергия жүйесі инфрақұрылымының автономды компоненттері бар. Осылайша оларды коммуналдық желілердің сыртқы желісіне тәуелсіз басқаруға болады, дегенмен жергілікті контроллерлер тиісті шешімдер қабылдай алады. Алайда ақылға қонымды құны бар орталықтандырылған жүйені жүзеге асыру салыстырмалы түрде қиын, ол нарықта бір сағат ішінде тұрақты түрде ставка жасай алады, сонымен бірге микро желіні өшіруге немесе белгілі бір жүктемені өшіруге немесе келесі қысқа уақыт аралығында тұрақсыз

жұмыс кезінде белгілі бір қондырғы қондырғысын реттеуге мүмкіндік алады. Осыған байланысты мәселе деректерді беру инфрақұрылымына қатысты. Микро желінің үздіксіз және қауіпсіз жұмыс істеуі үшін шектеулі ақпарат алмасу үшін қарапайым жергілікті желі/жергілікті контроллер қажет. Орталықтандырылмаған тәсілді қолдану әр блок өндірушіге және таратылған энергия жүктемелеріне ережелерге сәйкес бағдарламаланатын агентті жабдық контроллеріне енгізуге мүмкіндік береді. Екінші жағынан, орталықтандырылған жүйеде кез келген жаңа модульді орнату Орталық контроллерде қосымша бағдарламалауды және оны жүзеге асыру үшін бүкіл жүйені бөлісуді қажет етеді [7].

Кәдімгі микрожүйеде микрожүйеге қосылған жергілікті жүктемелерден сұранысты анықтау үшін арнайы байланыс арналары (жергілікті желі) бар, ал таратылған микрожүйе жергілікті басқару әрекетін орындауға мүмкіндік беретін компоненттер арасындағы тең-теңімен байланыс желісін пайдаланады. Тең-теңімен байланыс таратылған басқаруға шешім қабылдау және тиісті басқару әсері тұрғысынан үлкен сенімділік береді. Деректер алмасу жүйелердің осы түрлерін қарастырудың маңызды факторы болып табылады. Орталықтандырылған микрожүйеден айырмашылығы, жүктеме туралы ақпарат ағыны таратылған контроллерде жергілікті түрде орындалуы мүмкін, сондықтан деректер ағыны орталықтандырылған желі арқылы аз әсер етеді. Бұл зерттеу орташа кернеулі тұрақты токтың микро желісіне салыстырмалы талдау жүргізді және таратылған. Алайда осы әдістер микросеталардың құрылымы мен топологиясына байланысты, басқару стратегиясы орталықтандырылған микро жүйеге қарағанда, жүктеменің өзгеруіне төзімді екенін көрсетеді.

#### **Электроэнергетика жүйесіндегі мультиагенттік жүйе тұжырымдамасы**

Агент – бұл белгілі бір ортада орналасқан және сол ортадағы өзгерістерге дербес

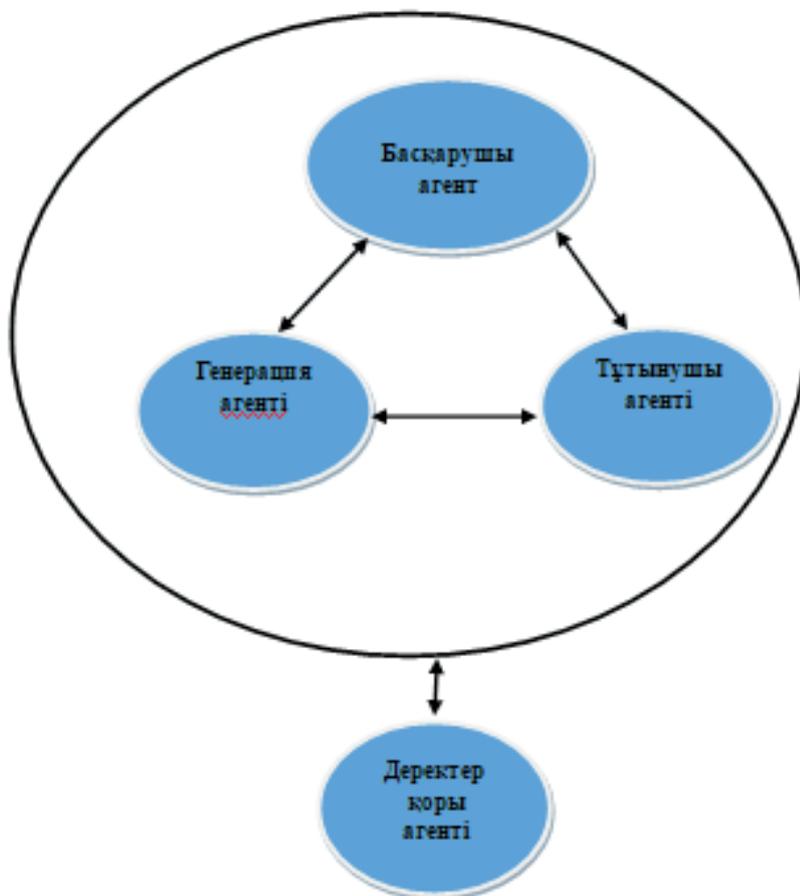
жауап бере алатын бағдарламалық немесе аппараттық нысан. Балама анықтамаға сәйкес агент ортадағы жүйенің жобалық міндетін дербес шешетін әрекеттерді орындау мүмкіндігі бар ортада орналасқан жүйе болып саналады. Сондықтан сенсорлар мен қуатты электронды құрылғылар (коммутаторлар) арқылы бақылау шешімдерін орындау үшін бүкіл желіні саналы түрде басқаратын субъект болуы керек. Демек, электр энергетикасы жүйесіндегі көп агентті жүйелер – бұл ортақ мақсаттары бар және энергияны басқару, бақылау және агенттер арасындағы байланыс жүйесіне қатысты тиісті шешімдер қабылдау үшін дербес әрекет ететін жүйеде көптеген агенттердің жиынтығы. Сонымен қатар мультиагентті жүйе – бұл бір агент немесе жүйенің мүмкіндіктерінен тыс болуы мүмкін мәселелерді шешу үшін өзара әрекеттесетін бірнеше ақылды агенттерден тұратын жүйе [8].

Осы анықтамаларға сүйене отырып, агенттер мультиагенттік жүйе ретінде әрекет етуі үшін агенттер өздігінен әрекет етуі, қоршаған ортаның ең жақсы мүдделерін білдіруі, бірлесіп жұмыс істеуі, келіссөздер жүргізуі және бірауыздан шешім қабылдауы қажет. Мультиагентті жүйелер адамның немесе басқа агенттердің тікелей араласуынсыз әрекет ете алуы керек және өздерінің мінез-құлқы мен ішкі жағдайын бақылауы және икемді автономды әрекетке ие болуы керек, ол келесі сипаттамаларды көрсетеді: агенттер қоршаған ортаны қабылдап, ондағы динамикалық өзгерістерге уақтылы жауап беруі керек, агенттер қоршаған ортаға жауап беріп қана қоймай, мақсатты мінез-құлық танытуы тиіс, өздерінің дизайн мақсаттарына жету үшін бастама көтеріп, ал агенттер мүмкіндігінше басқа агенттермен, немесе өз міндеттерін орындауға тырысатын адамдармен өзара әрекеттесіп, басқаларға өз қызметінде көмектесуі қажет.

Сыртқы электр желісіне қосылған микро желі үшін классикалық көп агентті жүйенің архитектурасы 4-суретте көрсетілген. Жүйе агенттердің төрт түрінен тұрады, атап айтқанда басқарушы агент (Control Agent),

генерациялау агенті (DER – agent), тұтынушы агенті (User Agent), дерекқор (Database Agent). Мультиагенттік жүйе жұмысында әрбір агент бірегей мақсаттар мен міндеттерге ие. Бірлескен жұмыс кезінде барлық агенттер

энергиямен жабдықтау сапасын және микро энергия жүйесінің сенімділігін сақтау болып табылатын ортақ мақсатқа жету бағытында жұмыс істейді.



4-сурет. Мультиагентті жүйе құрылымы [10].

**Мультиагенттік жүйелерді қолдануға талдау**  
Біз мультиагентті жүйелерді қолдануды

талдаймыз, 1-кестеде авторларының тәжірибесін қарастырамыз.

**1-кесте. Мультиагентті жүйелерді салыстырмалды талдау**

№	Авторлар	Қарастырылған мәселесі
1.	Jiahu Qin және т.б. [11].	Консенсус және көп агенттік жүйелерді үйлестіру
2.	Yara Rizk және т.б. [12].	Бұл шолуда MAS бірлескен шешім модельдері бойынша соңғы бес жылдағы жұмыстар зерттелді
3.	Amira Mohammed; Shady S. Refaat [13].	Мақалада mg айнымалы тогының негізгі функциялары мен проблемалары туралы толық сипаттама берілген және басқарудың иерархиялық архитектурасы тиімді шешім ретінде сипатталған. Сондай-ақ басқару деңгейлері туралы егжей-тегжейлі талқылау бар.
4.	NouhaDkhili және т.б. [14].	Аталған жұмыста электр желілерінің "ақылды желілерге" эволюциясы таратылған генерацяның таралуы мен осыған орай ерекшеліктерге байланысты зерттеледі.

5.	Dayong Ye және т.б. [15].	Сол сияқты өзін-өзі ұйымдастыратын көп агентті жүйелер саласындағы соңғы онжылдықтардағы әдебиеттерге шолу берілген
6.	AS Nair және т.б. [16].	Зерттеуде ақпараттық және коммуникациялық технологиялар, өлшеу, бақылау және автоматтандыру технологиялары. Электр электроникасы және энергияны сақтау технологиялары тұрғысынан зияткерлік желілердің маңызды мәселелеріне егжей-тегжейлі шолу жасалады.
7.	Arun Sukumaran Nair және т.б. [17].	Еңбекте MAS-ті экономикалық диспетчерлендіруге (ED) және зияткерлік желілердегі жеке міндеттемелерге (UC) қолдану туралы әдебиеттерге жан-жақты шолу жасалады
8.	hJ Alejandro Torreño және т.б. [18].	Сонымен қатар шешуші бағдарламаларға ерекше назар аударып, MAP-тің ең өзекті тәсілдері қарастырылады
9.	Luis M. Camarinha-Matos және т.б. [19].	Осы мақаланың мақсаты энергетика саласындағы бірлескен желілердің модельдерін, тәсілдері мен құралдарын қолдануға қатысты үрдістерді, мүмкіндіктер мен проблемаларды анықтау мақсатында жаңа әдебиеттерге жүйелі шолу жасау болып табылады
10	Farhan H.Malik және т.б. [20].	Бұл құжат зияткерлік желінің негізгі сипаттамаларына, агент анатомиясына және зияткерлік желінің мақсатына жету үшін осы ақылды агенттердің энергетикалық жүйеде қолданылуына көңіл бөледі.

Авторлардың еңбектерін қарап, талдағаннан кейін [1]-[10] зерттеулерде әртүрлі әдістер қолданылды деп айта аламыз. Энергия тұтынуды басқару және микро желідегі басқаруды оңтайландыру бір немесе бірнеше мақсатты функцияға ие болуы мүмкін. Бұл функциялар ұсынылған оңтайландыру міндетіне байланысты ерекшелене алады. Бұл бір мақсатты немесе көп мақсатты мәселелерге әкелуі мүмкін, оған шығындарды азайту (пайдалану және техникалық қызмет көрсету құны, отын құны және батареялар немесе конденсаторлар сияқты сақтау элементтерінің бұзылу құны), шығарындыларды азайту және қанағаттандырылмаған жүктемелерді азайту кіреді.

Зерттеушілер біріктірілген байланыс мәселесін шешу үшін орталықтандырылған, иерархиялық және таратылған модельдерде мультиагентті жүйелерді қолдануды зерттеді. Зерттеу [9] және [10] үйлестіру стратегиялары мен генетикалық алгоритмнің тұжырымдамаларын қолданатын таратылған модельге назар аударды.

Зерттеулерге сәйкес мультиагентті жүйелер қазіргі заманғы өнеркәсіптік жүйелерде көлік, қаржы портфелін басқару, энергияны оңтайландыру, ақылды құрылыс және ақылды қалалар, жасанды интеллектуалды жүйелер, энергия жүйелерін жоспарлау және маркетинг және басқару жүйелері сияқты қосымшалары бар қуатты құрал ретінде өзін

танытты. Осылайша мультиагентті жүйе – бұл өте маңызды технология, әмбебап және оны барлық аспектілерде, соның ішінде микро-желіде де қолдануға болады.

#### Қорытынды

Жыл сайын электр энергиясын тұтыну артып келеді, сондықтан энергия жүйесі өте күрделі. Қазақстанда SmartGrid интеллектуалды желісін енгізумен "KEGOC" АҚ айналысады, оның жоспарында – белсенді-бейімделген желі құру, нәтижесінде ол елдің зияткерлік энергия жүйесінің өзегі болуы тиіс [22].

Сонымен қатар Алматы энергетика және байланыс университетінде Smart технологияларды Қазақстанның бірыңғай энергетикалық жүйесіне енгізуді зерттеумен айналысатын «Зияткерлік электр энергетикалық жүйелер» Ғылыми-зерттеу зертханасы жұмыс істейді.

Бұл мақалада микрожүйеде көп агентті жүйені қолдануға шолу жасалды. Сондай-ақ микро желілерге анықтамалар берілді, микро желілер құрылымы көрсетілді, әртүрлі салаларда мультиагентті жүйелерді қолдану ұсынылды. Сонымен қатар тұжырымдамалар, мультиагентті жүйелердің тұжырымдамасы, басқарудың төрт стратегиясы бойынша жіктелген микро желілерді басқарудың әркелкі аспектілеріне жан-жақты шолу қарастырылды, яғни олардың артықшылықтары, кемшіліктері мен айырмашылықтары бойынша талқыланды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. <https://zerde.gov.kz/images/%D0%93%D0%9F%20%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%9A%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D1%85%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%20%D0%BD%D0%B0%202017-2020%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B.pdf>.
2. M. Azeroual, T. Lamhamdi, H.E. Moussaaoui, H.E. Markhi. Real-time distributed systems control and energy management using multi-agent technologies//International Meeting on Advanced Technologies in Energy and Electrical Engineering – 2019.
3. F.Z. Harmouch, N. Krami, D. Benhaddou, N. Hmina, E. Zayer, E.H. Margoum. Survey of multiagents systems application in Microgrids//IEEE – 2016.
4. Eduard Bullich-Massagué, Francisco Díaz-González, Mònica Aragüés-Peñalba, Francesc Girbau-Llistuella, Pol Olivella-Rosell, Andreas Sumper. Microgrid clustering architectures//Applied Energy. – 2018. – Том 212. – 340-361б.
5. <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-of-Microgrid-and-Its-Communication-Protocols-Tripathi-Basak./403efbb281486a7d6192b82ed4953e8468b4edcb>
6. Andrew Tuckey, Sasan Zabihi. Decentralized Control of a Microgrid//– IEEE – 2017.
7. Farshad Khavari, Ali Badri, Ali Zangeneh, Morteza Shafiekhani. A Comparison of Centralized and Decentralized Energy-Management Models of Multi-microgrid Systems//Smart Grids Conference – 2017.
8. Muhammad Waseem, Khanab Jie Wang. The research on multi-agent system for microgrid control and optimization.// Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2017. – Том 80. – 1399-1411 б.
9. Abhilash Kantamneni a, n, E. Laura Brown a, Gordon Parker b, Wayne W. Weaver. Survey of multi-agent systems for microgrid control.// Engineering Applications of Artificial Intelligence – 2015. – Том 45 . – 192-203б.
10. Н.А. Карджаубаев, Мультиагентное регулирование напряжения в многосвязных электрических сетях// Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – 2018
11. Я.В. Марков. Совершенствование принципов мультиагентного подхода к моделированию элементов электротехнических комплексов и систем нефтяной отрасли// Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – 2016.
12. J Qin, Q Ma, Y Shi, L Wang. Recent Advances in Consensus of Multi-Agent Systems: A Brief Survey// IEEE – 2016,
13. Y Rizk, M Awad, EW Tunstel, Y Rizk, M Awad, EW Tunstel. Decision Making in Multiagent Systems: A Survey //IEEE – 2018.
14. A Mohammed, SS Refaat, S Bayhan, A Mohammed, SS Refaat, S Bayhan. AC Microgrid Control and Management Strategies: Evaluation and Review//IEEE. – 2019. – Том 6
15. D Ye, M Zhang, AV Vasilakos. A Survey of Self-Organization Mechanisms in Multiagent Systems.//IEEE. – 2016.
16. N Dkhili, J Eynard, S Thil, S Grieu. A survey of modelling and smart management tools for power grids with prolific distributed generation//Sustainable Energy, Grids and Networks. – 2020. – Том 21.
17. I Colak, S Sagiroglu, G Fulli, M Yesilbudak. A survey on the critical issues in smart grid technologies.//Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2016. – Том 54. – 396-405 б.
18. AS Nair, T Hossen, M Champion, DF Selvaraj. Multi-Agent Systems for Resource Allocation and Scheduling in a Smart Grid.// Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy – 2018. – Том 3.
19. A Torreño, E Onaindia, A Komenda. Cooperative Multi-Agent Planning: A Survey.// ACM Computing Surveys November – 2017.

20. M. Luis. Camarinha-Matos. Collaborative smart grids – A survey on trends. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – 2016. – Том 65. – 283-2946.
21. FH Malik, M Lehtonen. A review: Agents in smart grids.// *Electric Power Systems Research* – 2016. – Том 131. – 71-796.
22. <https://kursiv.kz/news/biznes/2019-11/v-kazahstane-stroyat-umnuyu-elektroenergetiku>

## REFERENCES

1. <https://zerde.gov.kz/images/%D0%93%D0%9F%20%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%9A%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D1%85%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%20%D0%BD%D0%B0%202017-2020%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B.pdf>.
2. Azeroual M., Lamhamdi T., Moussaoui H.E., Markhi H.E. Real-time distributed systems control and energy management using multi-agent technologies // *International Meeting on Advanced Technologies in Energy and Electrical Engineering* – 2019.
3. Harmouch F.Z., Krami N., Benhaddou D., Hmina N., Zayer E., Margoum E.H. Survey of multiagents systems application in Microgrids // *IEEE* – 2016.
4. Eduard Bullich-Massagué, Francisco Díaz-González, Mònica Aragüés-Peñalba, Francesc Girbau-Llistuella, Pol Olivella-Rosell, Andreas Sumper. Microgrid clustering architectures // *Applied Energy*. – 2018. – Том 212. – 340-3616.
5. <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-of-Microgrid-and-Its-Communication-Protocols-Tripathi-Basak./403efbb281486a7d6192b82ed4953e8468b4edcb>
6. Andrew Tuckey, Sasan Zabih. Decentralized Control of a Microgrid // *IEEE* – 2017.
7. Farshad Khavari, Ali Badri, Ali Zangeneh, Morteza Shafiekhani. A Comparison of Centralized and Decentralized Energy-Management Models of Multi-microgrid Systems // *Smart Grids Conference* – 2017.
8. Muhammad Waseem, Khanab Jie Wang. The research on multi-agent system for microgrid control and optimization. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – 2017. – Том 80. – 1399-14116.
9. Abhilash Kantamneni a, n, Laura E. Brown a, Gordon Parker b, Wayne W. Weaver. Survey of multi-agent systems for microgrid control. // *Engineering Applications of Artificial Intelligence* – 2015. – Том 45. – 192-2036.
10. Kardzhaubayev N.A. Multiagentnoye regulirovaniye napryazheniya v mnogosvyaznykh elektricheskikh setyakh // *Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* – 2018
11. Markov Ya.V. Sovershenstvovaniye printsipov multiagentnogo podkhoda k modelirovaniyu elementov elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem neftyanoy otrasli // *Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* – 2016.
12. J Qin, Q Ma, Y Shi, L Wang. Recent Advances in Consensus of Multi-Agent Systems: A Brief Survey // *IEEE* – 2016,
13. Y Rizk, M Awad, EW Tunstel, Y Rizk, M Awad, EW Tunstel. Decision Making in Multiagent Systems: A Survey // *IEEE* – 2018.
14. A Mohammed, SS Refaat, S Bayhan, A Mohammed, SS Refaat, S Bayhan. AC Microgrid Control and Management Strategies: Evaluation and Review // *IEEE*. – 2019. – Том 6
15. D Ye, M Zhang, AV Vasilakos. A Survey of Self-Organization Mechanisms in Multiagent Systems // *IEEE*. – 2016.
16. N Dkhili, J Eynard, S Thil, S Grieu. A survey of modelling and smart management tools for power grids with prolific distributed generation // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. – 2020. – Том 21.

17. I Colak , S Sagiroglu , G Fulli , M Yesilbudak . A survey on the critical issues in smart grid technologies.//Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2016. – Том 54. – 396-4056.
18. AS Nair, T Hossen, M Campion, DF Selvaraj. Multi-Agent Systems for Resource Allocation and Scheduling in a Smart Grid.// Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy – 2018. – Том 3.
19. A Torreño, E Onaindia, A Komenda. Cooperative Multi-Agent Planning: A Survey.// ACM Computing Surveys November – 2017.
20. Luis M.Camarinha-Matos. Collaborative smart grids – A survey on trends. // Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2016. – Том 65. – 283-2946.
21. FH Malik, M Lehtonen. A review: Agents in smart grids.// Electric Power Systems Research – 2016. – Том 131. – 71-796.
22. <https://kursiv.kz/news/biznes/2019-11/v-kazakhstane-stroyat-umnuyu-elektroenergetiku>

---

**Information about authors:**

1. Tolegenova G. – Kazakh-British Technical University
2. Zhukabaeva T. – Kazakh-British Technical University
3. Zakirova A. – Kazakh-British Technical University
4. Abdildaeva A. – Kazakh-British Technical University

**НОРМАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ  
ТЕМПЕРАТУРНО-ПРОЧНОСТНОГО КОНТРОЛЯ БЕТОНА****УТЕПОВ Е. Б.<sup>1,2</sup>, ТУЛЕБЕКОВА А. С.<sup>1,2</sup>, КАЗКЕЕВ А. Б.<sup>1,3</sup>, ОШАН М. М.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ТОО «CSI Research & Lab», 010000, Нұр-Сұлтан, Қазақстан<sup>2</sup> Евразийский Национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 010000, Нұр-Сұлтан, Қазақстан<sup>3</sup> Государственный университет имени Шакарима, 070000, Семей, Қазақстан

*Аннотация.* Метод зрелости является подходом к контролю качества бетона, который прогнозирует прочность на месте, основываясь на внутренней температуре. Известно, в процессе твердения бетона происходит процесс гидратации цемента. В результате этого процесса цемент затворяется водой, из-за чего выделяется энергия. В таком случае температура и влажность являются основными характеристиками для контроля прочности бетона. Степень зрелости зависит от изменяющихся условий твердения путем измерения и регистрации внутренней температуры бетона с помощью специальных датчиков и регистров, встроенных в момент укладки бетона. Сегодня данный подход широко используется во всем мире. Однако существуют и другие методы расчетов, регламентированные в стандартах других стран. Данная статья посвящена анализу существующих методов температурно-прочностного контроля бетона. В статье приведен перечень нормативной документации, регламентирующей данные требования, обсуждаются особенности, преимущества и недостатки. Также авторы обосновывают необходимость формирования унифицированного подхода к температурно-прочностному контролю бетона.

*Ключевые слова:* прочность, температура твердения бетона, контроль прочности, напряжение, техническое регулирование.

**БЕТОНДЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ-БЕРІКТІК БАҚЫЛАУ ӘДІСТЕРІН  
НОРМАТИВТІК РЕТТЕУ****УТЕПОВ Е. Б.<sup>1,2</sup>, ТУЛЕБЕКОВА А. С.<sup>1,2</sup>, КАЗКЕЕВ А. Б.<sup>1,3</sup>, ОШАН М. М.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> «CSI Research & Lab» ЖШС, Нұр-Сұлтан, Қазақстан<sup>2</sup> Л. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, 01000, Нұр-Сұлтан, Қазақстан<sup>3</sup> Шәкәрім атындағы мемлекеттік университеті, 070000, Семей, Қазақстан

*Аңдатпа.* Кемелдену әдісі – бұл бетонның сапасын бақылаудың тәсілі, ол ішкі температураға негізделген жерде беріктікті болжайды. Бетонды қатайту процесінде цементті ылғалдандыру процесі жүретіні белгілі. Осы процестің нәтижесінде цемент сумен жабылады, соның салдарынан энергия шығады. Бұл жағдайда температура мен ылғалдылық бетонның беріктігін бақылаудың негізгі сипаттамалары болып табылады. Жетілу дәрежесі бетонның ішкі температурасын өлшеу және бетон төсеу кезінде салынған арнайы сенсорлар мен регистрлердің көмегімен өлшеу және тіркеу арқылы өзгеретін қатайту жағдайларына байланысты. Бүгінгі таңда бұл тәсіл бүкіл әлемде кеңінен қолданылады. Алайда басқа елдердің стандарттарында реттелетін басқа есептеу әдістері бар. Бетонның температурасын және беріктігін бақылаудың қолданыстағы әдістерін талдауға арналған. Мақалада осы талаптарды реттейтін нормативтік құжаттаманың тізімі берілген, ерекшеліктері, артықшылықтары мен кемшіліктері талқыланады. Сондай-ақ авторлар бетонның температурасын және беріктігін бақылауға бірыңғай көзқарас қалыптастыру қажеттілігін негіздейді.

*Түйінді сөздер:* беріктік, бетонның қатаю температурасы, беріктікті бақылау, кернеу, техникалық реттеу.

## NORMATIVE REGULATION OF METHODS OF TEMPERATURE AND STRENGTH CONTROL OF CONCRETE

UTEPOV Y.B.<sup>1,2</sup>, TULEBEKOVA A.S.<sup>1,2</sup>, KAZKEYEV A.B.<sup>1,3</sup>, OSHAN M.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> «CSI Research & Lab» LLP, 010000, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>2</sup> L. Gumilyov Eurasian National University, 010000, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>3</sup> Shakarim State University, 070000, Semey, Kazakhstan

**Abstract.** *The maturity method is an approach to concrete quality control that predicts the in-situ strength based on internal temperature. It is known that the cement hydration process takes place during the hardening of concrete. This process causes the cement to become waterlogged, due to which energy is released. Temperature and moisture are then the main characteristics to control the strength of concrete. The degree of maturity depends on the changing curing conditions by measuring and recording the internal temperature of the concrete using special sensors and registers embedded in the concrete at the time of placement. This approach is now widely used all over the world. There are, however, other methods of calculation regulated in the standards of other countries. The following article is devoted to the analysis of existing methods of temperature and strength control of concrete. A list of normative documents regulating these requirements is given in the article, the features, advantages and disadvantages are discussed. Also the authors justify the necessity of formation of the unified approach to temperature-strength control of concrete.*

**Keywords:** *strength, concrete curing temperature, strength control, stress, technical regulation.*

### Введение

Бетон набирает необходимую прочность постепенно в процессе твердения. Знание и понимание внешних и внутренних характеристик твердения бетона, таких как относительная влажность и температура, позволяет определить полную картину о наборе прочности бетона. Поэтому очень важно определять с высокой точностью значение прочности этого материала перед использованием изделий или конструкций в строительстве.

Определение фактической прочности бетона непосредственно в строительных конструкциях является сложной технической задачей. Эту задачу можно решить только путем использования косвенных величин, связанных с прочностью.

Развитие теоретических и экспериментальных исследований в области контроля качества привело к появлению значительного количества методов оценки прочности бетона. Каждый из существующих методов имеет определенную область применения, свои достоинства и недостатки. Контроль прочности бетона по результатам испытаний на сжатие образцов кубов не может полностью удовлетворять работников лабораторий, проектиров-

щиков и строителей, потому что результаты испытаний образцов не всегда отражают действительную прочность бетона в изделиях и конструкциях [1].

В ряде случаев контроль прочности бетона путем испытания стандартных образцов создает определенные трудности. Например, часто возникает необходимость дополнительно определить прочность бетона в более поздние сроки, чем предполагалось ранее; однако отсутствие контрольных образцов не позволяет это сделать. Также прочность бетона конструкции проверяют путем высверливания из нее цилиндров (кернов) с последующим испытанием их на сжатие. Обычно в лабораторию доставляют керны с неправильными основаниями, поэтому перед испытаниями на сжатие их необходимо выровнять, залить цементным раствором и подшлифовать. Подготовленные цилиндры испытывают на сжатие на гидравлическом прессе. Для определения марки бетона полученную прочность цилиндров размером умножают на коэффициент 0,8. Однако этот метод нельзя применять для испытания бетона некоторых сборных железобетонных конструкций из-за малой толщины и высокого процента армирования.

Такие конструкции надо испытывать неразрушающими методами [2].

#### **Методы определения прочности бетона**

Существует ряд механических и физических методов, позволяющих определить прочность бетона в различных местах железобетонных изделий и конструкций без их разрушения. В этих методах используются различные приборы, основанные на принципе получения пластической деформации поверхности бетона путем заглабления в него бойка (шарика) при ударе с определенной силой, а также на принципе упругого отскока от поверхности бетона и получения значения упругой деформации [3].

К физическим относят акустические методы и проникающих излучений. Их принципиальное отличие от рассмотренных ранее заключается в том, что они позволяют судить о качестве бетона и других строительных материалов не только по поверхностному слою, но и по внутренней структуре. В акустических методах косвенной характеристикой прочности и однородности является скорость распространения по материалу волн упругих колебаний. Ультразвуковой метод заключается в регистрации скорости прохождения УЗ волн. По технике проведения испытаний можно выделить сквозное УЗ прозвучивание, когда датчики располагают с разных сторон тестируемого образца, и поверхностное прозвучивание, когда датчики расположены, с одной стороны [4].

Наиболее важной является проблема нахождения градуировочных зависимостей, потому что без этих зависимостей все данные, полученные ультразвуковым методом не являются наглядными и доказательными. Градуировочную зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью бетона на сжатие определяют предварительно для конкретного состава бетона. Это связано с тем, что применение градуировочных зависимостей для бетонов других или неизвестных составов может привести к ошибкам в определении прочности. На зависимость «прочность бетона - скорость ультразвука» влияют следующие факторы, колебания кото-

рых нужно учитывать при применении ультразвукового метода контроля [4]:

- количество и зерновой состав заполнителя;
- изменение расхода цемента более чем на 30%;
- способ приготовления бетонной смеси;
- степень уплотнения бетона;
- напряженное состояние бетона.

Ультразвуковой метод позволяет осуществлять массовые испытания изделий любой формы многократно, вести непрерывный контроль нарастания или снижения прочности. Недостатком метода является погрешность при переходе от акустических характеристик к прочностным. При использовании ультразвукового метода определения прочности бетона на результаты оказывают влияние слишком много факторов, которые необходимо учесть с помощью градуировочных зависимостей. Например, учет влажности.

В последние годы отмечается значительный рост применения прогнозирования прочности бетона, основанные на современных технологиях, таких как встроенные датчики и сенсоры, машинное обучение и искусственный интеллект. Эти методы особенно эффективны в случае нелинейной взаимосвязи между различными параметрами системы, как и в поведении параметров бетона [5–7].

Наиболее адаптированным для этой цели в настоящее время является метод температурно-прочностного контроля, базирующегося на взаимосвязи температуры бетона и времени его выдерживания (температуро-часы). Превышение нормы уровня температурного напряжения могут вызвать появление трещин, что крайне недопустимо.

#### **Стандарты по методам температурно-прочностного контроля бетона**

Температура бетонной смеси – один из важных технологических показателей качества бетонной смеси. При контроле прочности бетона различными измерительными системами передача информации о текущей температуре идет в измерительный прибор. Полученные значения температур бетона и времени их замеров используют для расчета

текущей прочности бетона. Расчеты могут быть выполнены следующими методами [8]:

- 1) по температурным графикам;
- 2) по зрелости;
- 3) по аналитическим зависимостям.

Методы температурно-прочностного контроля бетона регламентированы в нормах и стандартах, принятых в разных странах, представленных в таблице 1.

**Таблица 1. Стандарты по методам температурно-прочностного контроля бетона [9]**

Стандарт		Страна
ASTM C1074	Standard Practice for Estimating Concrete Strength by Maturity Method	USA
ASTM C918	Standard Test Method for Measuring Early-Age Compressive Strength and Projecting Later-Age Strength	
ACI 318- 6.2	Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary	
ACI 228.1R	In-place Methods to Estimate Concrete Strength	
ACI 306R	Guide to Cold Weather Concreting	
AASHTO T325	Standard Method of Test for Estimating the Strength of Concrete in Transportation Construction by Maturity Tests.	
CSA A23.1/A23.2	Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Test Methods and Standard Practice for Concrete	Канада
NCH 170	Hormigon- Requisitos generals (Concrete- General requirements	Южная Африка
EN 206-1: 2002	Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity	Европа
BS EN 1367	Execution of concrete structures	
NEN 5970	Determination of Strength of Fresh Concrete with the Method of Weighted Maturity	
СТ-НП СРО ССК-04-2013	Температурно-прочностной контроль бетона при возведении монолитных конструкций в зимний период	Россия

Стандарт ASTM регламентирует, что выделяют 4 этапа использования метода расчета текущей прочности бетона по его зрелости [10]:

- 1) Установление зависимости зрелость-прочность (в лабораторных условиях);
- 2) Встраивание датчиков зрелости внутрь опалубки (на строительной площадке);
- 3) Считывание датчиками показателей зрелости бетона (на строительной площадке);
- 4) Анализ данных.

Для расчета индекса зрелости применяется такое выражение, как функция зрелости.

Функция зрелости - математическое выражение, которое использует измеренную историю температуры цементной смеси в течение периода твердения для расчета индекса, указывающего на зрелость в конце этого периода. Используя рассчитанный индекс зрелости и соотношение прочности и зрелости, оценивается прочность бетона [10] .

Есть две альтернативные функции для вычисления индекса зрелости на основе измеренной температурной истории бетона. Одна

функция зрелости используется для вычисления температурно-временного коэффициента, следующим образом по формуле [10]:

$$M(t) = \sum(T_c - T_0)\Delta t \quad (1)$$

Где  $M(t)$  - температурно-временной фактор при возрасте  $t$ , градус-дни или градус-часы;

$\Delta t$ - временной интервал, дни или часы;

$T_c$  - средняя температура бетона за промежуток времени,  $\Delta t$ , ° C;

$T_0$  - базовая температура.

Этот подход предполагает, что скорость развития прочности является линейной функцией температуры. Чтобы вычислить температурно-временной коэффициент, необходимо знать соответствующее значение базовой температуры для конкретных материалов и условий.

Базовая температура представляет собой температуру, ниже которой не происходит реакция гидратации цемента, от чего сильно зависит набор прочности. Базовая температура может зависеть от типа цемента, типа и дозировки примесей или других добавок,

влияющих на скорость гидратации, а также от температурного диапазона, который будет испытывать бетон при твердении.

Результатом использования формулы 1 является график зависимости прочности от температурно-временного показателя.

Другая функция зрелости предполагает, что скорость развития прочности подчиняется экспоненциальному уравнению Аррениуса, которая используется для вычисления эквивалентного возраста при указанной температуре следующим образом [10]:

$$t_e = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_3}\right)\Delta t} \quad (2)$$

$t_e$  - эквивалентный возраст при указанной температуре  $T_3$ , дней или час,

$Q$  - энергия активации, деленная на газовую постоянную, К

$T_c$  - средняя температура бетона за промежуток времени,  $\Delta t$ ,

$T_3$  - заданная температура, К,

$\Delta t$  - временной интервал, дни или часы.

Эквивалентный возраст - количество дней или часов при заданной температуре, необходимых для достижения зрелости, равной зрелости, достигаемой за время твердения при температуре, отличающейся от заданной.

Предположение о том, что скорость развития прочности подчиняется уравнению Аррениуса, приводит к функции зрелости, приведенной в уравнении (2), которая используется для вычисления эквивалентного возраста при заданной температуре. Для вычисления эквивалентного возраста необходимо знать энергию активации для конкретных материалов и условий. Показано, что энергия активации зависит от типа цемента, вида и дозировки примесей, влияющих на скорость развития прочности, а также от соотношения воды и цементных материалов. Для других условий и когда требуется максимальная точность оценка прочности, соответствующее значение  $Q$  может быть определено экспериментально.

В зарубежной практике из-за сложности расчета эквивалентный возраст используется реже по сравнению с температурно-временным показателем.

Некоторые типы инструментов зрелости,

которые вычисляют температурно-временной фактор, могут не использовать соответствующую базовую температуру и, следовательно, не указывать истинное значение этого фактора. Значение температурно-временного коэффициента, отображаемого прибором, может быть скорректировано для базовой температуры следующим образом [11]:

$$M_c = M_d - (T_0 - T_d)t \quad (3)$$

$M_c$  - скорректированный температурно-временной коэффициент, градус-дни или градус-часы;

$M_d$  - температурно-временной коэффициент, отображаемый прибором, градус-дни или градус-часы;

$T_0$  - соответствующая исходная температура для бетона, °С;

$T_d$  - базовая температура, заложенная в прибор;

$t$  - время, прошедшее с момента включения прибора до момента снятия показаний, дни или ч.

После использования метода расчета прочности бетона по его зрелости, следующий этап осуществляется следующим образом: когда зрелость достигает значения, которое равно или больше требуемого, значение записывается, при необходимости проверяется правильность его значения. Перед выполнением критических операций, таких как снятие опалубки или последующее натяжение, необходимо дополнительно определить зрелость бетона с помощью других тестов, чтобы убедиться, что бетон в конструкции имеет достаточную прочность.

Российский стандарт СТ-НП СРО ССК-04-2013 [8] содержит требования по контролю с использованием термопар, термометров, пирометров или термодатчиков с передачей информации о текущей температуре бетона в измерительный прибор. Полученные значения температур бетона и времени их замеров используют для расчета текущей прочности бетона. Расчеты могут выполняться по нескольким методам: по температурным графикам (Рисунок 1), по зрелости бетона, по аналитическим зависимостям.



Рис. 1 – Схема расчета по температурным графикам

### Заключение

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее стандартизированным является метод зрелости. История исследования эффективности его использования началась еще в 1950 году. Идея, состоявшая в том, чтобы разработать метод оценки эффективности «обработки паром» на развитие прочности, сегодня претерпела поправки и позволила модифицировать и повысить точность оценки прочности бетона.

Сегодня метод зрелости рассматривается как полезное и простое средство для определения влияния времени и температуры на развитие прочности. Однако, и другие методы имеют свои особенности и возможности. Поэтому формирование унифицированного подхода к ТПКБ является актуальным вопросом и позволит достигнуть высокое качество и долговечность бетонных и железобетонных конструкций.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08956209).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Malek J., Kaouther M. Destructive and non-destructive testing of concrete structures // Jordan J. Civ. Eng. 2014. Vol. 8, № 4. P. 432–441.
2. Зубков В.А. Определение прочности бетона. 1998. № Москва. P. 120.
3. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2011. Vol. 4. P. 10–15.
4. ГОСТ 17624-2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. 2012.
5. N.J. Carino H.S.L. The maturity method: from theory to application // P.C. Chang. D.C. Washingt. (Eds.), Proc. 2001 Struct. Congr. 2001.
6. N.J. Carino, H.S. Lew C.K.V. Early age temperature effects on concrete strength prediction by the maturity method, // J. Am. Conc. Inst. 1982. Vol. 80, № 2. P. 93–101.
7. Rudeli N., Santilli A., Arrambide F. Striking of vertical concrete elements: An analysis using the maturity method // Eng. Struct. 2015. Vol. 95. P. 40–48.

8. СТ–НП СРО ССК–04–2013. Температурно–прочностной контроль бетона при возведении монолитных конструкций в зимний период. 2013. P. 25.
9. Giatec. The best concrete sensor in 2020 [Electronic resource]. 2020. URL: <https://www.giatecscientific.com/education/the-best-concrete-sensors-2020/> (accessed: 07.10.2020).
10. ASTM C918. Standard Test Method for Measuring Early–Age Compressive Strength and Projecting Later–Age Strength. 2019. P. 12.
11. ASTM C1074-17. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. 1998.

## REFERENCES

1. Malek J., Kaouther M. Destructive and non-destructive testing of concrete structures // Jordan J. Civ. Eng. 2014. Vol. 8. № 4. P. 432–441.
2. Zubkov V.A. Opredeleniye prochnosti betona. 1998. № Moskva. P. 120.
3. Ulybin A.V. O vybore metodov kontrolya prochnosti betona postroyennykh sooruzheniy // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2011. Vol. 4. P. 10–15.
4. GOST 17624-2012. Betony. Ultrazvukovoy metod opredeleniya prochnosti. 2012.
5. N.J. Carino H.S.L. The maturity method: from theory to application // P.C. Chang, D.C. Washingt. (Eds.). Proc. 2001 Struct. Congr. 2001.
6. N.J. Carino. H.S. Lew C.K.V. Early age temperature effects on concrete strength prediction by the maturity method. // J. Am. Conc. Inst. 1982. Vol. 80. № 2. P. 93–101.
7. Rudeli N., Santilli A., Arrambide F. Striking of vertical concrete elements: An analysis using the maturity method // Eng. Struct. 2015. Vol. 95. P. 40–48.
8. СТ–НП СРО ССК–04–2013. Температурно–прочностной контроль бетона при возведении монолитных конструкций в зимний период. 2013. P. 25.
9. Giatec. The best concrete sensor in 2020 [Electronic resource]. 2020. URL: <https://www.giatecscientific.com/education/the-best-concrete-sensors-2020/> (accessed: 07.10.2020).
10. ASTM C918. Standard Test Method for Measuring Early–Age Compressive Strength and Projecting Later–Age Strength. 2019. P. 12.
11. ASTM C1074-17. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. 1998.

---

### Information about authors:

1. Utepov Yelbek Bakhitovich – PhD, associate professor, Head of R&D Department, CSI Research & Lab LLP, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6723-175X>  
Email: [utepov-elbek@mail.ru](mailto:utepov-elbek@mail.ru)
2. Tulebekova Assel Serikovna – PhD, Senior Researcher, R&D Department, CSI Research & Lab LLP, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8553-3081>  
Email: [krasavka5@mail.ru](mailto:krasavka5@mail.ru)
3. Kazkeyev Alizhan Baurzhanuly – Master of Engineering, Junior Researcher, R&D Department, CSI Research & Lab LLP, Shakarim State University of Semey city  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6591-7440>  
Email: [alizhan7sk@gmail.com](mailto:alizhan7sk@gmail.com)
4. Oshan Madina Maksatkyzy – Master student, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9736-4366>  
Email: [madina\\_16.96@mail.ru](mailto:madina_16.96@mail.ru)

ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
ХАБАРШЫСЫ

HERALD  
OF THE KAZAKH-BRITISH TECHNICAL UNIVERSITY

ВЕСТНИК  
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Ответственный за выпуск	Есбергенов Досым Бектенович
Редакторы	Сәрсенбекова Разия Далабаева Айсара Садганова Эльмира Скуратова Ирина Мазибаева Жанар
Компьютерный дизайн и верстка	Жадыранова Гульнур

Подписано в печать 09.09.2021 г.  
Тираж 300 экз. Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ .  
Бумага тип. Уч.-изд.л. 6,5. Заказ №166 .

Редакция журнала «Вестник КБТУ» не несет ответственность за содержание публикуемых статей. Содержания статей целиком принадлежат авторам, и размещаются в журнале исключительно под их ответственность.