

# Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал  
№ 11 (114)/2023 Том 1

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Макаровский Денис Анатольевич**

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Штерензон Вера Анатольевна

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

2. Синьковский Антон Владимирович

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

3. Штерензон Владимир Александрович

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

4. Зыков Сергей Арленович

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

5. Дронсейко Виталий Витальевич

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович  
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:  
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А  
E-mail: [info@euroasia-science.ru](mailto:info@euroasia-science.ru) ;  
[www.euroasia-science.ru](http://www.euroasia-science.ru)

Учредитель и издатель ООО «Логика+»  
Тираж 1000 экз.

# СОДЕРЖАНИЕ

## МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

*Jing-Li Fu, Chun Xiang, Hui-Dong Cheng,  
Fa-sheng Liu, Chen Yin,  
Yong Xin Guo, Zuo-Yuan Yin*

GENERALIZED VIRTUAL DISPLACEMENT PRINCIPLES  
OF DEFORMED OBJECTS WITH METHODS OF  
ANALYTICAL MECHANICS .....3

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

*Бондарчук В.В., Кравченко Н.М.*

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССОМ ДЕТЕКЦИИ ЭКЗОГЕННЫХ И  
ЭНДОГЕННЫХ ФАКТОРОВ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭМОЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА ..... 14

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Емельянова И.В.*

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА  
СТАНКОВ С ЧПУ .....24

*Зборовская М.И., Фартуков В.А.*

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ И  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ  
ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ ..... 29

*Зборовская М.И., Фартуков В.А.*

БЕЗ МАЛЫХ РЕК НЕТ РЕК БОЛЬШИХ ..... 35

*Зборовская М.И.,*

*Фартуков В.А., Мелехин Н.П.*

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КАК  
ПРИРОДОПРИБЛИЖЕННЫЕ СИСТЕМЫ ..... 41

*Зиборев А.В.*

ВНЕДРЕНИЕ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В  
СФЕРЕ ДЕВЕЛОПМЕНТА И СТРОИТЕЛЬСТВА .....44

*Мельников В.С.*

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК.  
КУМУЛЯЦИЯ ТЕПЛА И МОДИФИКАЦИИ  
АЛГОРИТМА ЗАЖИГАНИЯ .....53

*Кулебякин А.В., Весова Л.М.*

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОПОРЫ, КАК СРЕДСТВО  
ОПТИМАЛЬНОЙ СЕЙСМОЗАЩИТЫ, ДОСТОИНСТВА  
И НЕДОСТАТКИ .....65

**МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА****GENERALIZED VIRTUAL DISPLACEMENT PRINCIPLES OF DEFORMED OBJECTS WITH METHODS OF ANALYTICAL MECHANICS<sup>1</sup>***Jing-Li Fu<sup>1,2</sup>, Chun Xiang<sup>2</sup>, Hui-Dong Cheng<sup>1</sup>, Fa-sheng Liu<sup>1</sup>,  
Chen Yin<sup>1</sup>, Yong Xin Guo<sup>3</sup> & Zuo-Yuan Yin<sup>4</sup>**<sup>1</sup>College of Information and Control Engineering,**<sup>2</sup>Shandong Vocational University of Foreign Affairs,**<sup>3</sup>Shandong Weihai 264504, China**<sup>4</sup>College of Mechanical and Automotive Engineering,**<sup>5</sup>Zhejiang University of Water Resources and Electric Power,**<sup>6</sup>Zhejiang Hangzhou 310018, China**<sup>7</sup>School of Physics, Liaoning University,**<sup>8</sup>Liaoning Shenyang 110036, China**<sup>9</sup>R&D department, Finetech GmbH,**<sup>10</sup>Berlin 12681, Germany***ABSTRACT**

Analytical mechanics is the most basic discipline. The basic principles of analytical mechanics should also be applicable to general deformed objects. However, the virtual displacement principle proposed by analytical mechanics is only applicable to particle systems and rigid body systems, but not to general deformed objects. In this paper, the generalized virtual displacement principle of general deformed objects (such as, elastic objects, plastic objects, elasto-plastic objects and flexible objects etc ) is derived by the method of analytical mechanics, which is also applicable to particle systems and rigid body systems. First of all, according to the method of analytical mechanics, the external force, internal force, constraint reaction force and elastic recovery force of the deformed object system under the equilibrium state are analyzed, and the concepts of virtual displacement, ideal constraint and virtual work are introduced, and the generalized virtual displacement principle (also called generalized virtual work principle) of deformed objects is proposed; secondly, vector form, coordinate component form and generalized coordinate form of generalized virtual displacement principle of deformed object are given; thirdly, as the application of the principle, the virtual displacement principle of deformed objects in plane polar coordinate system, space cylindrical coordinate system and spherical coordinate system is given; finally, a brief conclusion is drawn. This work unifies the virtual displacement principle of elastic object, plastic, elastoplastic etc deformed object systems and rigid object systems with the basic method of analytical mechanics. It is a basic principle for dealing with the static problems of deformed objects. This work also lays a foundation for the further study of the dynamics of deformed object systems.

**Keyword:** virtual displacement principle; deformed object; constitutive relationship; analytical mechanics

PASC: 11.10.Ef; 45.40.-f; 45.50.-j

### 1. Introduction.

Analytical mechanics is a mechanical system suitable for studying macro object. However, now his research objects are the particle system, and the number of particles can be from one to infinity. Particle system can be regarded as an ideal model of mechanical system composed of macro objects, such as rigid body, elastomeric, elastic-plastic, continuous medium and their complex. These rigid bodies and deformed objects can be studied by the method of analytical mechanics. Analytical mechanics uses generalized coordinates, puts forward ideal constraints, and studies the motion of macro objects from the perspective of finding the energy of the system[1,2]. Analytical mechanics puts forward two basic principles of constraint mechanics system, namely, virtual displacement principle and d'Alembert-Lagrange principle (also known as general dynamic equation). Using the virtual displacement

principle, we can solve the static problems of the constrained object system. Using the D'alambert-Lagrange principle, we can further derive various forms of dynamic equations and solve the dynamic problems of the constrained dynamical system. <sup>[3]</sup> The important concept of virtual displacement of an object is put forward in analytical mechanics. The virtual displacement of an object must meet the constraints of the object. It is a collection of infinitesimal displacements that may occur in the space region at a certain instant or at a certain position. There can be an infinite number of virtual displacements, which are independent of the motion of the object. The two basic principles of analytical mechanics are based on this concept[4,5]. We should point out that the most basic virtual displacement principle given by analytical mechanics should be applicable to rigid bodies and deformed objects, while analytical mechanics only gives the virtual displacement principle of rigid objects

<sup>1</sup> This work was supported by the Natural Science Foundation of China (11872335), the Major science and technology projects of the Ministry of Water Resources of China (SKS-2022053), and Key R&D Plan Projects in Zhejiang Province of China (2022C02035)

and their combinations, which solves the static problems of rigid objects [1-4]. Obviously, the virtual displacement principle given previously in analytical mechanics is limited in application.

We can divide macroscopic objects into rigid bodies and deformed objects. The static and dynamic problems of rigid bodies and their combinations have been comprehensively and deeply studied in existing theories of analytical mechanics, which has been formed. [5,7,8,] Deformable objects can be divided into elastic objects and elastic-plastic objects. The principle of virtual displacement of deformed objects has been given in structural mechanics, which is a basic principle of deformed objects[9,10]. The principle of virtual displacement of deformed objects is that the virtual work done directly by external forces (including volume force and area force) is equal to the strain energy required of deformed objects, or the principle of virtual displacement is obtained by using the second law of thermodynamics. However, in these studies, the important concepts of virtual displacement and ideal constraint are rarely discussed. In fact, the virtual displacement of deformation object must meet the constraint condition, and the constraints are the ideal constraint. Elastic-plastic objects are deformable objects that can be elastic or plastic in different environments. Elastoplasticity is a basic property in material forming. The virtual displacement principle of elastic-plastic objects is of great value in the research of material forming. The establishment of the virtual displacement principle of elastic-plastic deformable body is also based on the fact that the virtual work of the external force on the deformable body is equal to the virtual strain energy of the elastic body. We should point out that the virtual displacement principle of elastic-plastic objects must also be limited by ideal constraints. It can be seen that the virtual displacement principle of deformed objects in structural mechanics and elasticity rarely involves the concept of ideal constraints, nor is it based on the balance of deformed objects under external forces.

In the history of scientific development, people always try to unify the basic theories of mechanics, elastic mechanics, continuum mechanics, thermodynamics, electromagnetics, solids and deformed objects to better reveal the development laws of nature. At the turn of the 20th century, attempts to unify laws of mechanics and laws of reversible thermodynamics were made successfully by Hadamard [11] for thermal expansion of ideal gas. Efforts to unify two laws continued and was extended to irreversible thermodynamic law recently [12,13]. In 1973, Germain [14] extended the principle of virtual work in classical continuum mechanics for continua to multipolar media, called principle of Virtual Power, which was further extended by Maugin to couple the thermo-mechanical field with electro-magnetic field [15]. At the end of 20th century, many research works of the irreversible

thermodynamic that included irreversible thermodynamics done by Maugin [16] and others afterwards have been summarized in a major research monograph. A unified procedure for constructing theories of thermomechanics of multipolar media was initiated by Green and Rivlin[17] and then extended to include thermodynamics by Green and Naghdi[18,19]. Attempts were made by Sieniutycz and Berry [20] to define a Lagrangian in an action-type integral for the deformation of continuum with dissipation, and by Maugin [21] to develop the analytical mechanics of dissipative materials. In all these major works except the one by Biot, the constitutive equations of material must still be supplemented from the laws of thermodynamics or other postulates. In 2011, Pao et al unify the principle of virtual power of thermomechanics for fluids and solids with dissipation[22]. In recent years, the principle of virtual displacement has been widely used in science and engineering technology, and many good results have been achieved [23,24,25,26]. For the deformed object system, the key to solve the problem is to consider the physical properties (constitutive relations) of the object materials.

In this paper, the generalized principle of virtual displacement of constrained deformed objects is proposed by using the method of analytical mechanics. For the deformed object in equilibrium, based on the concept of ideal constraint, under the action of volume external force and area external force, the virtual displacement satisfying the constraint conditions of the deformed object is introduced, and the virtual displacement principle of the general deformed object is proposed. The generalized virtual displacement principle proposed by is general, which is not only suitable for elastic objects, plastic objects and flexible material objects, but also suitable for rigid objects.

The research of this paper is divided into the following parts: Section 1, introduction; section 2, in this part, the generalized principle of virtual displacement of deformed objects is proposed using the method of analytical mechanics; section 3, several forms of virtual displacement principle of deformed object are given; section 4, virtual displacement principle of deformed objects is applied in plane **polar coordinate, space cylindrical and spherical coordinates**; section 5, a simple conclusion is given.

2. Generalized virtual displacement principle of the deformation objects

The generalized virtual displacement principle of deformed object is a basic principle of deformed object dynamics. It can solve the static problems of deformed object, including the deformation problem when the system is in equilibrium or uniform motion under the action of external force. In this section, we only study the deformation problem in equilibrium, and the conclusion is also suitable for the deformation problem in uniform motion.

2.1 Establishing of virtual displacement principle

For a deformed volume element  $\Delta V_i$  in equilibrium state, it is affected by external force including the volume force  $\mathbf{f}_i^V$  distributed in the region  $V$  and the area force  $\mathbf{f}_i^S$  acting on the area  $\Delta S_i$ , the other are internal forces  $\mathbf{f}_i^i$  (namely gravitation between particles), elastic restoring force  $\mathbf{f}_i^l$  and constraint force  $\mathbf{R}_i$ , the resultant force is equal to zero, namely

$$\mathbf{f}_i^V + \mathbf{f}_i^S + \mathbf{f}_i^i + \mathbf{f}_i^l + \mathbf{R}_i = 0. (1)$$

At a certain time  $t$ , it is assumed that the deformed volume element has a virtual displacement  $\delta \mathbf{r}_i$ , then the virtual work of the forces on the deformed object is written in the form

$$\Delta W = \sum_{i=1}^N \mathbf{f}_i^V \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta V_i + \sum_{i=1}^N \mathbf{f}_i^S \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta S_i + \sum_{i=1}^N \mathbf{f}_i^i \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta V_i + \sum_{i=1}^N \mathbf{f}_i^l \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta V_i + \sum_{i=1}^N \mathbf{R}_i \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta S_i = 0, (2)$$

where  $\Delta S_i$  is the deformed area element.

Since the gravitation between particles is a pair of forces and reactions, so

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{f}_i^i \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta V_i = 0. (3)$$

Assumption based on the concept of ideal constraints, one has

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{R}_i \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta V_i = 0. (4)$$

Substitution of Eqs.( 3) , (4) into Eq.(2) ,we have

$$\Delta W = \sum_{i=1}^N \mathbf{f}_i^V \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta V_i + \sum_{i=1}^N \mathbf{f}_i^S \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta S_i + \sum_{i=1}^N \mathbf{f}_i^l \cdot \delta \mathbf{r}_i \Delta V_i = 0, (5)$$

then the virtual work of deformable body under the virtual displacement  $\delta \mathbf{r}_i$  can be written the following form

$$\delta W = \int_V \mathbf{f}^V \cdot \delta \mathbf{r} dV + \int_S \mathbf{f}^S \cdot \delta \mathbf{r} dS + \int_V \mathbf{f}^l \cdot \delta \mathbf{r} dV = 0. (6)$$

It is well known that the relationship of between the virtual work of elastic resilience and the virtual strain energy of defamtion object is the flowing form

$$\delta U = - \int_V \mathbf{f}^l \cdot \delta \mathbf{r} dV = \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV (7)$$

Substitution of the Eq.(7) into the Eq.(6), one has

$$\delta U = \int_V \mathbf{f}^V \cdot \delta \mathbf{r} dV + \int_S \mathbf{f}^S \cdot \delta \mathbf{r} dS = \delta W, (8)$$

or

$$\delta U = \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_V \mathbf{f}^v \cdot \delta \mathbf{r} dV + \int_S \mathbf{f}^s \cdot \delta \mathbf{r} dS = \int_V (\mathbf{f}^V + \nabla \cdot \mathbf{f}^S) \cdot \delta \mathbf{r} dV. (9)$$

The Eq.(8) or Eq. (9) are called the generalized virtual displacement principle of deformation object in the equilibrium. Where the volume force  $\mathbf{f}^V$  is a force there are proportional to the mass of each particle of a deformed object, such as gravity, magnetic force and  $\mathbf{f}^S$  the inertial force, reaction force and friction force etc. We call  $\mathbf{f}^V + \nabla \cdot \mathbf{f}^S = \mathbf{f}$  equivalent volume force.

2.2 Formulation of generalized virtual displacement principle

**Generalized virtual displacement principle:** the sufficient and necessary condition for the balance of an object is the sum of the virtual work on the virtual displacement of the active force acting on the defamtion object, under the ideal constraint, including the external force and the elastic restoring force, is equal to zero. That is the sum of virtual works of the external force equal the strain energy of defamtion object.

We proposed that the virtual displacement principle of defamtion object, which it is a generalized principle on body balance. Using this principle, we can obtain the virtual displacement principles of elastic object, plastic object, elastic-plastic object and flexible object etc. we can also obtain the virtual displacement principles of the particle, the rigid object, the multibody.

3. Several forms on the virtual displacement principle

In this section, we give the several different expressions of virtual displacement principle of deformed objects.

3.1 Vector form on the virtual displacement principle

A deformed object as shown in Fig. 1: Let an elastic body consist of  $N$  flexible volume elements, which deform under the action of external force. The inertial coordinate system is established at the bottom of the elastic body, the unit vectors of the coordinate axis are  $(e_1, e_2, e_3)$ , and the other end is the free end.

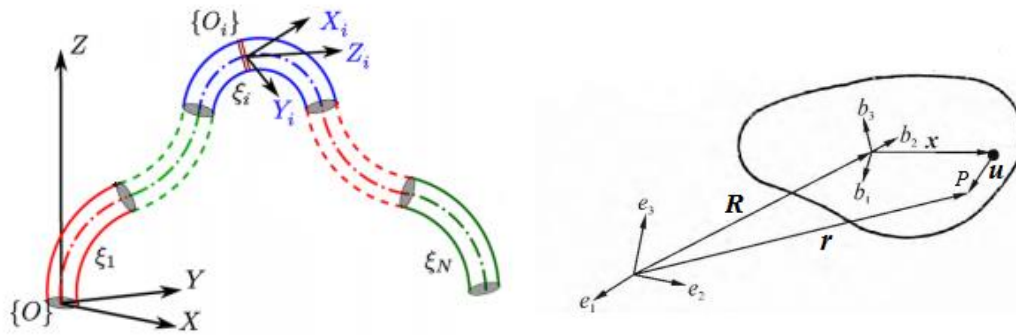


Fig.1 Elastic body consist of  $N$  flexible volume elements Fig.2 Position vector representation

Different from the rigid body system, the deformation of body under the action of external force, and the relative position of each point in the system also changes. In order to accurately describe the motion and deformation of the body, the fixed inertial coordinate system  $(e_1, e_2, e_3)$  and the moving coordinate system  $(b_1, b_2, b_3)$  are established. For any point in the deformable body, the position vector is expressed in Fig.2.

For a deformed object, the radius vector  $\delta r$  of volume element is written as

$$\delta r = \delta(R + Ax + Au) = \delta X + \delta u, \quad X = R + Ax \quad (10)$$

where  $\delta R$  is the virtual displacement of centroid of deformed object,  $A$  is the coordinate transformation matrix,  $\delta X$  is the virtual displacement of rigid body time, and  $\delta u$  is the virtual displacement of deformation object. The Eq. (6) is expressed in the form

$$\delta W = \int_V f^V \cdot \delta X dV + \int_S f^S \cdot \delta X dS + \int_V f^V \cdot A \delta u dV + \int_S f^S \cdot A \delta u dS + \int_V f^I \cdot A \delta u dV = 0, \quad (11)$$

we should points out that the Eq.(11) is the generalized virtual displacement principle of deformable object in equilibrium state. That is the sum of the virtual work done by the volume force, area force and elastic restoring force of deformable object equal to zero in equilibrium state. At this time, the spatial motion of the deformable object is in states of static or uniform motion, and the virtual displacement principle of rigid object in equilibrium state needs to be satisfied, that is

$$\int_V f^V \cdot \delta X dV + \int_S f^S \cdot \delta X dS = 0, \quad (12)$$

then the deformation motion of the object must also be in the state of static or uniform motion, which satisfies the virtual displacement principle, namely

$$\int_V f^V \cdot \delta u dV + \int_S f^S \cdot \delta u dS + \int_V f^I \cdot \delta u dV = 0, \quad (13)$$

$$\text{namely } \int_V f^V \cdot \delta u dV + \int_S f^S \cdot \delta u dS = \int_V (f^V + \nabla \cdot f^S) \cdot \delta u dV = \int_V f \cdot \delta u dV = \int_V \sigma \delta \epsilon dV. \quad (14)$$

The Eq.(11) are called the vector forms of generalized virtual displacement principle for defamation objects. We are also Eq.(14) the vector forms of virtual displacement principle of defamation objects and the Eq.(12) the virtual displacement principle of the particle system and Rigid objects.

Now we give the following conclusions: for the deformed object in equilibrium or static state, its overall motion satisfies the virtual displacement principle (12) of rigid body, and the deformation motion satisfies the virtual displacement principle (14) of deformed object.

If  $\delta u = 0$ , the Eq.(11) express the vector forms of virtual displacement principle (12) of the rigid objects.

If we focus of the deformation of objects on the equilibrium problem, then the Eq.(14) expresses the vector forms of virtual displacement principle of defamation objects.

### 3. 2 Coordinate component form of virtual displacement principle:

Take the inertial coordinate system, the unit vectors of their coordinate axis are  $(e_1, e_2, e_3)$ , and we express the external forces  $f^V$  and  $f^S$ , elastic restoring force  $f^I$  and virtual displacement in the form of inertial coordinate system. The external force  $f^V, f^S, f^I$  and  $\delta r$  are written the component forms respectively

$$\begin{aligned} \mathbf{f}^V &= f_x^V \mathbf{e}_1 + f_y^V \mathbf{e}_2 + f_z^V \mathbf{e}_3, & \mathbf{f}^S &= f_x^S \mathbf{e}_1 + f_y^S \mathbf{e}_2 + f_z^S \mathbf{e}_3, \\ \mathbf{f}_i^l &= f_x^l \mathbf{e}_1 + f_y^l \mathbf{e}_2 + f_z^l \mathbf{e}_3, \end{aligned} \quad (15)$$

and

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{r} &= \delta(A\mathbf{x} + A\mathbf{u}) = \\ &+ A\delta x \mathbf{e}_1 + A\delta y \mathbf{e}_2 + A\delta z \mathbf{e}_3 + A\delta u \mathbf{e}_1 + A\delta v \mathbf{e}_2 + A\delta w \mathbf{e}_3. \end{aligned} \quad (16)$$

where  $A$  is a transformation matrix between two coordinate systems.

Then the virtual displacement principle is expressed the following coordinate component forms

$$\begin{aligned} &\int_V A[f_x^V \delta x + f_y^V \delta y + f_z^V \delta z] dV \\ &+ \int_V [(f_x^V + f_x^l)A\delta u + (f_y^V + f_y^l)A\delta v + (f_z^V + f_z^l)A\delta w] dV \\ &+ \int_S (f_x^S \delta x + f_y^S \delta y + f_z^S \delta z) dS + \int_S (f_x^S A\delta u + f_y^S A\delta v + f_z^S A\delta w) dS = 0, \end{aligned} \quad (17)$$

namely

$$\int_V [f_x^V \delta x + f_y^V \delta y + f_z^V \delta z] dV + \int_S (f_x^S \delta x + f_y^S \delta y + f_z^S \delta z) dS = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &\int_V [(f_x^V + f_x^l)A\delta u + (f_y^V + f_y^l)A\delta v + (f_z^V + f_z^l)A\delta w] dV \\ &+ \int_S (f_x^S A\delta u + f_y^S A\delta v + f_z^S A\delta w) dS = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

the Eq.(18) is also written as

$$\begin{aligned} &\int_V (f_x^V A\delta u + f_y^V A\delta v + f_z^V A\delta w) dV \\ &+ \int_S (f_x^S A\delta u + f_y^S A\delta v + f_z^S A\delta w) dS = \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV. \end{aligned} \quad (20)$$

We should point out Eq.(18) is the coordinate component form of generalized virtual displacement principle of the deformed object considering the overall motion (rigid body) in the equilibrium state, and Eq.(20) is the coordinate component form of generalized virtual displacement principle of the deformed object in the equilibrium state.

### 3.3 Generalized coordinate form of the virtual displacement principle.

The virtual displacement principle is the most common principle of statics and it is widely used to solve the statics problems. The virtual displacement principle on generalized coordinates is expressed by: Under the double-sided, ideal, Holonomic and stable constraints, the necessary and sufficient condition for the equilibrium of deformation body is that the sum of the element work in any virtual displacement of the volume force, area force and elastic resilience acting on the system is equal to zero.

In the deformation body composed of  $N$  units, we take any unit body  $dV_i$  and its area  $dS_i$ , which it affected by the external force  $\mathbf{f}_i^V$ , the area force  $\mathbf{f}_i^S$ , elastic restoring force  $\mathbf{f}_i^l$  and constraint force  $\mathbf{R}_i$ .

Supposing the deformation body suffering  $l$  holonomic constraints, and the number of independent variables describing the system is  $n=3N-l$ , then the system described by  $n$  generalized coordinates  $q_1, q_2, \dots, q_n$ . The position of a point of deformed object is represented as

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad i = 1, 2, 3 \quad (21)$$

the position of a point of a deformed object is represented. This deformation displacement can be expressed as

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_i(x_1(\mathbf{q}), x_2(\mathbf{q}), x_3(\mathbf{q})) = \mathbf{u}_i(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad i = 1, 2, 3 \quad (22)$$

The stress and strain components can be written, respectively, as

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}(x_1(\mathbf{q}), x_2(\mathbf{q}), x_3(\mathbf{q})) = \sigma_{ij}(q_1, q_2, \dots, q_n), \\ \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}(x_1(\mathbf{q}), x_2(\mathbf{q}), x_3(\mathbf{q})) = \varepsilon_{ij}(q_1, q_2, \dots, q_n). \end{aligned} \quad (23)$$

The components of virtual displacement  $\delta \mathbf{r}, \delta \mathbf{x}$  and  $\delta \mathbf{u}$  are expressed, respectively, in the following forms

$$\begin{aligned} \delta r &= \frac{\partial r}{\partial q_s} \delta q_s, \quad s = 1, 2, \dots, n \\ \delta x_1 &= \delta x = \frac{\partial x}{\partial q_s} \delta q_s, \quad \delta x_2 = \delta y = \frac{\partial y}{\partial q_s} \delta q_s, \quad \delta x_3 = \delta z = \frac{\partial z}{\partial q_s} \delta q_s, \\ \delta u &= \frac{\partial u}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial q_s} \delta q_s = \frac{\partial u}{\partial q_s} \delta q_s, \quad \delta v = \frac{\partial v}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial q_s} \delta q_s = \frac{\partial v}{\partial q_s} \delta q_s, \quad \delta w = \frac{\partial w}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial q_s} \delta q_s = \frac{\partial w}{\partial q_s} \delta q_s. \end{aligned} \quad (24)$$

The virtual strain  $\delta \varepsilon_{ij}$ , virtual stress  $\delta \sigma_{ij}$ , which can be expressed as the forms of generalized coordinates respectively

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ \delta \varepsilon_{ij} &= \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial q_s} \delta q_s = \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial q_s} \delta q_s, \quad (s = 1, 2, \dots, n; \quad i, j = 1, 2, 3) \\ \delta \sigma_{ij} &= \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial q_s} \delta q_s = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial q_s} \delta q_s \end{aligned} \quad (25)$$

The generalized virtual displacement principle of deformation objects are written in following general coordinate form

$$\begin{aligned} &\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial q_s} \delta q_s dV = \int_V \left( f_x^V \frac{\partial x}{\partial q_s} + f_y^V \frac{\partial y}{\partial q_s} + f_z^V \frac{\partial z}{\partial q_s} \right) \delta q_s dV \\ &+ \int_S \left( f_x^S \frac{\partial x}{\partial q_s} + f_y^S \frac{\partial y}{\partial q_s} + f_z^S \frac{\partial z}{\partial q_s} \right) \delta q_s dS \\ &+ \int_V \left( f_x^V \frac{\partial u}{\partial q_s} + f_y^V \frac{\partial v}{\partial q_s} + f_z^V \frac{\partial w}{\partial q_s} \right) \delta q_s dV \\ &+ \int_S \left( f_x^S \frac{\partial u}{\partial q_s} + f_y^S \frac{\partial v}{\partial q_s} + f_z^S \frac{\partial w}{\partial q_s} \right) \delta q_s dS \\ &= \int_V Q_s^V \delta q_s dV + \int_S Q_s^S \delta q_s dS + \int_V \Phi_s^V \delta q_s dV + \int_S \Phi_s^S \delta q_s dS. \end{aligned} \quad (26)$$

When the deformed body being in equilibrium, we have the virtual displacement principles of rigidity objects as

$$\int_V Q_s^V \delta q_s dV + \int_S Q_s^S \delta q_s dS = 0, \quad (27)$$

and the virtual displacement principles of deformation objects

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial q_s} \delta q_s dV = \int_V \Phi_s^V \delta q_s dV + \int_S \Phi_s^S \delta q_s dS, \quad (28)$$

where the  $\Phi_s^V$ ,  $\Phi_s^S$  are generalized volume and area forces, and the strain energy is the following form

$$\begin{aligned} \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV &= \int_V \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial q_s} \delta q_s dV = \int_V \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial q_s} \delta q_s dV, \\ &i, j = 1, 2, 3; \quad s = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (29)$$

We should show that the  $q_s$  are lengths,  $\Phi_s^V$ ,  $\Phi_s^S$  are the generalized forces, and the  $q_s$  is angles,  $\Phi_s^V$ ,  $\Phi_s^S$  the generalized moments.

The Eqs.(27) and (28) are called the virtual displacement principle of deformed objects and rigid objects under the generalized coordinate respectively, and the Eq.(26) the generalized virtual displacement principle of deformed objects in the generalized coordinate.

#### 4. Application of the generalized Virtual displacement principle of deformation object

In this section, we give the virtual displacement principles and constitutive relations of deformation objects under polar coordinate, **cylindrical coordinate** and spherical coordinate systems using the generalized virtual displacement principle of systems.

##### 4.1 Polar coordinate form of the virtual displacement principle of elastic plane problems

In the study of plane problems, the section geometry (boundary) of some objects is circular and annular shaped, we taking generalized coordinates  $q_1=r$ ,  $q_2=\theta$ . That is described by polar coordinate  $(r, \theta)$  and subject



to volume forces  $f_r, f_\theta$  and area forces  $F_r, F_\theta$ . In this section, we give the polar coordinate form of the virtual displacement principle of plane deformation problems.

The relationships between rectangular coordinates and polar coordinates are written as

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta, \quad (30)$$

and

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} = \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}, \\ \frac{\partial}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial y} = \sin \theta \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}. \end{aligned} \quad (31)$$

We can obtain

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}. \quad (32)$$

Strain components  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$  and  $\gamma_{r\theta}$  are written as []

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}, \quad \gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}. \quad (33)$$

where  $u_r, u_\theta$  are the displacements along  $r, \theta$  direction.

In the polar coordinate system, the stresses in the plane are written as  $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ . For plane stress problem, the constitutive relation:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta), \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r), \quad \gamma_{r\theta} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{r\theta}, \quad (34)$$

for plane strain problem, the constitutive relation:

$$\sigma_r = \frac{1-\nu^2}{E} \left( \varepsilon_r - \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_\theta \right), \quad \sigma_\theta = \frac{1-\nu^2}{E} \left( \varepsilon_\theta - \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_r \right), \quad \tau_{r\theta} = \frac{2(1+\nu)}{E} \gamma_{r\theta}. \quad (35)$$

Using the virtual displacement principle of plane elastic body we can obtain the equilibrium equations in the following polar coordinate form [31]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\theta) + f_r &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + f_\theta &= 0, \end{aligned} \quad (36)$$

and strain compatibility equation as

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varepsilon_r}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r \varepsilon_\theta) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} (r \gamma_{r\theta}) - \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial r} = 0. \quad (37)$$

The stress in plane strain problem are expressed by

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\theta) = \frac{E}{1-\nu^2} \left[ \frac{\partial u_r}{\partial r} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right) \right], \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_r) = \frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} + \nu \frac{\partial u_r}{\partial r} \right), \\ \tau_{r\theta} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{r\theta} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right). \end{aligned} \quad (38)$$

When the volume force  $f_r = f_\theta = 0$ , the stress component in the basic equation of the stress method can be expressed as an unknown function  $\varphi(r, \theta) = 0$  to be solved, and the equation satisfied by the stress function  $\varphi(r, \theta)$  [31]

$$\nabla^4 \varphi(r, \theta) = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right)^2 \varphi(r, \theta) = 0, \quad (39)$$

the stress component  $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$  of the polar coordinate system is obtained by the differential of  $\varphi(r, \theta)$ , that is,

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r}, & \sigma_\theta &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2}, \\ \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} &= -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial \theta}\end{aligned}\quad (40)$$

#### 4.2 Cylindrical coordinate form of the virtual displacement principle of elastic object

For dynamic problems, the choice of coordinate system itself has nothing to do with the solution of the problem, but the choice of coordinate system is closely related to the description of dynamic equations and boundary conditions of the problem. In other words, the choice of coordinate system directly affects the difficulty of solving the problem.

In this section, we taking the generalized coordinates  $q_1 = r$ ,  $q_2 = \theta$ ,  $q_3 = z$ , then the virtual displacement principle of deformation objects in the cylindrical coordinate system is obtained with the generalized virtual displacement principle Eq.(27) of deformation objects.

In the cylindrical coordinate system, the position coordinates of a point  $m$  in space are represented by  $(r, \theta, z)$ . The relationships between rectangular coordinates and generalized coordinates are

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta, \quad z = z. \quad (41)$$

The displacement components in generalized coordinates (cylindrical coordinates) are

$$u_r = u_r(r, \theta, z), \quad u_\theta = u_\theta(r, \theta, z), \quad w = w(r, \theta, z), \quad (42)$$

the stress components as

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_r(r, \theta, z), & \sigma_\theta &= \sigma_\theta(r, \theta, z), & \sigma_z &= \sigma_z(r, \theta, z), \\ \tau_{r\theta} &= \tau_{r\theta}(r, \theta, z), & \tau_{\theta z} &= \tau_{\theta z}(r, \theta, z), & \tau_{zr} &= \tau_{zr}(r, \theta, z),\end{aligned}\quad (43)$$

and the strain components as

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \varepsilon_r(r, \theta, z), & \varepsilon_\theta &= \varepsilon_\theta(r, \theta, z), & \varepsilon_z &= \varepsilon_z(r, \theta, z), \\ \gamma_{r\theta} &= \gamma_{r\theta}(r, \theta, z), & \gamma_{\theta z} &= \gamma_{\theta z}(r, \theta, z), & \gamma_{zr} &= \gamma_{zr}(r, \theta, z).\end{aligned}\quad (44)$$

The relationship between strain components and displacement components in generalized coordinates are the following form

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}, & \varepsilon_\theta &= \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}, & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}, & \gamma_{z\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z}, & \gamma_{zr} &= \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}.\end{aligned}\quad (45)$$

The Eqs. (45) are also called the strain tensor of an elastic body in cylindrical coordinate.

The constitutive relations of deformation object in cylindrical coordinates are written as [31]

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \lambda \varphi + 2\mu \varepsilon_r, & \sigma_\theta &= \lambda \varphi + 2\mu \varepsilon_\theta, & \sigma_z &= \lambda \varphi + 2\mu \varepsilon_z, \\ \tau_{zr} &= \mu \gamma_{zr}, & \tau_{r\theta} &= \mu \gamma_{r\theta}, & \tau_{z\theta} &= \mu \gamma_{z\theta},\end{aligned}\quad (46)$$

where

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (47)$$

We call Eqs. (46) the constitutive relations of an elastic deformation object in cylindrical coordinate.

In cylindrical coordinates, the equilibrium equation of elastic object are obtained using the virtual displacement principle Eq.(27) [31]

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + F_r &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + F_\theta &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} + \frac{2\tau_{zr}}{r} + F_z &= 0.\end{aligned}\quad (48)$$

For the problem of axi-symmetry, that is, when the geometry, boundary conditions and constraints of the elastic body are symmetrical to a certain axis of symmetry, such as the z-axis, according to the symmetry of deformation, we have

$$u_r = u_r(r, z), \quad u_\theta = 0, \quad w = w(r, z),$$

the strain tensor of an elastic body as

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \gamma_{r\theta} &= 0, \quad \gamma_{z\theta} = 0, \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}, \end{aligned} \quad (49)$$

and the shear stress as

$$\tau_{r\theta} = \tau_{z\theta} = 0. \quad (50)$$

The equilibrium equation in axi-symmetry coordinates of elastic object, the Eqs.(48) can be written in the following form

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + F_r &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{2\tau_{zr}}{r} + F_z &= 0. \end{aligned} \quad (51)$$

### 4.3 Virtual displacement principle of elastic objects in spherical coordinate systems

When we taking the generalized coordination  $q_1 = r, q_2 = \theta, q_3 = \varphi$ , the virtual displacement principle of elastic object in the spherical coordinate system is given with the virtual displacement principle Eq.(27) of deformation objects.

In the spherical coordinate system, the position coordinates of a point  $m$  in space are represented by  $(r, \theta, \varphi)$ . The relationships between rectangular coordinates and spherical coordinates are

$$x = r \sin\theta \cos\varphi, \quad y = r \sin\theta \sin\varphi, \quad z = r \cos\theta.$$

We use  $u_r(r, \theta, \varphi), u_\theta(r, \theta, \varphi), u_\varphi(r, \theta, \varphi)$  to represent the displacement components of the spherical coordinate system respectively, and the relationship between strain components and displacement components in spherical coordinates are the following form

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{u_\theta}{r} \cot\theta + \frac{u_r}{r}, \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}, \quad \gamma_{r\varphi} = \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r}, \\ \gamma_{\theta\varphi} &= \frac{1}{r} \left( \frac{\partial u_\varphi}{\partial \theta} - u_\varphi \cot\theta \right) + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial u_\theta}{\partial \varphi}, \end{aligned} \quad (52)$$

equations (52) are also called the strain tensor of an elastic body in spherical coordinates.

Constitutive relations of elastic object in spherical coordinate system are [31]

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{\nu}{1-2\nu} \varphi + \varepsilon_r \right), \quad \sigma_\theta = \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \varepsilon_\theta \right), \quad \sigma_\varphi = \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \varepsilon_\varphi \right), \\ \tau_{r\varphi} &= \frac{E}{2(1-2\nu)} \gamma_{r\varphi}, \quad \tau_{r\theta} = \frac{E}{2(1-2\nu)} \gamma_{r\theta}, \quad \tau_{\theta\varphi} = \frac{E}{2(1-2\nu)} \gamma_{\theta\varphi}. \end{aligned} \quad (53)$$

In spherical coordinates, the equilibrium equations of elastic object are obtained, using the virtual displacement principle Eq.(27) in the following form

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} (2\sigma_r - \sigma_\theta - \sigma_\varphi + \tau_{r\theta} \cot\theta) + F_r &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial \tau_{\varphi \theta}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} ((\sigma_\theta - \sigma_\varphi) \cot\theta + 3\tau_{r\theta}) + F_\theta &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\varphi}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} (3\tau_{r\varphi} + 2\tau_{\theta\varphi} \cot\theta) + F_\varphi &= 0. \end{aligned} \quad (54)$$

For the problem of spherical symmetry, that is, the geometry of the object, constraints, external forces and other external factors are symmetrical to a certain point (such as the origin of the coordinate system).

According to the symmetry of the deformation of the object, the displacement of a point of the deformed object are written by  $u_r = u_r(r)$ ,  $u_\theta = 0$ ,  $u_\phi = 0$ , and some shear strains and shear stresses are equal to zero, i.e.  $\gamma_{r\theta} = \gamma_{r\phi} = \gamma_{\theta\phi} = 0$ , and  $\tau_{r\theta} = \tau_{r\phi} = \tau_{\theta\phi} = 0$ . The rest of the strain and stress components are only a function of coordinate  $r$ , independent of  $\theta$  and  $\phi$ .

The strain components and stress components are written by

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \varepsilon_\phi = \frac{u_r}{r}. \quad (55)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\phi = \sigma_T. \quad (56)$$

Constitutive relations are the following form

$$\sigma_r = \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{\nu}{1-2\nu} \varphi + \varepsilon_r \right), \quad \sigma_T = \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{\nu}{1-2\nu} \varphi + \varepsilon_T \right), \quad \varphi = \varepsilon_r + 2\varepsilon_T \quad (57)$$

The virtual displacement principle of elastic objects in spherical symmetrical coordinates can be written as [31]

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_T)}{r} + F_r = 0, \quad (58)$$

that is written in the form

$$\frac{E}{1+\nu} \frac{1-\nu}{1-2\nu} \left( \frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{2u_r}{r^2} \right) + F_r = 0. \quad (59)$$

## 5. Conclusions

Based on the current situation that the virtual displacement principle of rigid objects and deformed objects is studied separately, this paper adopts the method of analytical mechanics, the concept of ideal constraint and virtual displacement are introduced, the generalized virtual displacement principle of deformed objects is proposed; the generalized virtual displacement principle of deformable objects is general, which is applicable to both deformable objects of various materials and rigid objects. This research lays a foundation for solving the dynamic problems of flexible, intelligent and bionic material object systems in equilibrium.

### Disclosures

The authors declare no conflicts of interest.

### Data Availability Statement

The authors confirm that the data supporting the findings of this study are available within the article.

## References

- [1] J H Wang Analytical Dynamics (Beijing: Higher Education Press) (1958) (in Chinese)
- [2] B Chen Analytical Dynamics (Beijing: Peking University Press) (2017) (in Chinese)
- [3] F X Mei, D Liu and Y Luo Advanced Analytical Mechanics (Beijing: Beijing College of Science and Technology Press) (1993) (in Chinese)
- [4] J L Synge, and B A Griffith Principles of Mechanics (New York McGraw-Hill Inc.) (1970)
- [5] D T Greenwood Classical Dynamics (New York Prentice Hall) (1977)
- [6] H Goldstein Classical Mechanics (Massachusetts Addison-Wesley Publishing Co., Reading) p8 (1980)
- [7] L N Hand and J D Finch Analytical Mechanics (Cambridge: Cambridge University Press) (1998)
- [8] V I Arnold Mathematical Methods of Classical Mechanics (New York Springer Verlag) (1989)
- [9] Z D Xu and L W Ma Structural mechanics (Beijing: Science and Technology Press) (2007) (in Chinese)
- [10] L L Yu and Z G Yang Structural Mechanics (Second Edition) (Beijing: China Electric Power Press) (2014) (in Chinese)
- [11] J Hadamard Nature A71 196 (1904)
- [12] M A Biot Phys. Rev. A97 1463 (1955)
- [13] M A Biot Advances in applied mechanics (New York: Academic Press) Vol 24 p1-90 (1984)
- [14] P Germain SIAM Journal of Applied Mathematics A25 p556 (1973)
- [15] G A Maugin Acta Mechanica A35 p1 (1980)
- [16] G A Maugin Thermomechanics of nonlinear irreversible behaviors (Singapore: World Scientific Publishong Co.) (1999)
- [17] A E Green and R S Rivlin Proceedings of Royal Society of London Series A A284 p303 (1965)
- [18] A E Green and P M Naghdi Proceedings of Royal Society of London Series A A432 p171 (1991)
- [19] A E Green and P M Naghdi Proceedings of Royal Society of London Series A A448 p335 (1995)
- [20] S Sieniutycz and R S Berry Phys. Rev. E A 47 p1765(1993)
- [21] G A Maugin Rendiconti del Seminario Matematico Università e Politecnico di Torino A 58 p171 (2000)
- [22] Y H Pao , L S Wang and K C Chen International Journal of Engineering Science A49 p1502 (2011)

[23] P J Blanco, A Clause and R A Feijoo Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg. A315 p760 (2017)

[24] T Zhang, P Shi and X K Yue Mechanical Systems and Signal Processing A179 p109351 (2022)

[25] M Groß, J Dietzsch and C Rübiger Comput. Methods Appl. Mech. Engrg A350 p595 (2019)

[26] E Benvenuti , A Chiozzia , G Manzinib and N Sukuma Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg. A390 p114352 (2022)

[27] C Kim and M G Lee International Journal of Solids and Structures A233 p111204 (2021)

[28] Y Mei and S Avril International Journal of Solids and Structures A178 p136 (2019)

[29] X Wang , W Wu , H Zhu and H. Zhang Computers and Geotechnics A146 p104710 (2022)

[30] D Huyssteena , F L Rivarolab and G Etseb , P Steinmann Appl. Mech. Engrg. A393 p114549 (2022)

[31] Z L Xu Elasticity (Beijing: People's Education Press) (1982) (in Chinese)

[32] G T Yang Introduction of Elastoplastic Mechanics (Beijing: Tsinghua University Press) (2004) (in Chinese)

# КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

УДК 004.81

---

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДЕТЕКЦИИ ЭКЗОГЕННЫХ И ЭНДОГЕННЫХ ФАКТОРОВ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА

---

**Бондарчук В.В.**

*кандидат технических наук,*

*заведующий отделом распознавания зрительных образов*

**Кравченко Н.М.**

*кандидат технических наук,*

*старший научный сотрудник, с.н.с. отдела РЗО*

*Институт проблем искусственного интеллекта, г. Донецк*

## NEURAL NETWORK METHODOLOGY FOR CONTROLLING THE DETECTION PROCESS OF EXOGENOUS AND ENDOGENOUS FACTORS OF THE ADAPTIVE SYSTEM OF EMOTIONAL INTELLIGENCE

**V.V. Bondarchuk**

*Candidate of Technical Sciences,*

*Head of the Visual Image Recognition Department*

**N.M. Kravchenko**

*Candidate of Technical Sciences,*

*Senior Researcher, sns. VIR Department*

*Institute of Artificial Intelligence Problems, Donetsk*

*DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.114.1.1917*

### АННОТАЦИЯ

В работе представлены теоретические концепции нейросетевой методологии управления процессом детекции экзогенных и эндогенных факторов адаптивной системы искусственного эмоционального интеллекта для решения проблем в задачах взаимодействия когнитивных дисфункций с аппаратно-программным комплексом во время психоэмоциональной диагностики с возможностью саморегуляции безмедикаментозными средствами. Применение Python 3 в Visual Studio Code для описания, обучения и тестирования искусственной нейронной сети по распознаванию эмоций на человеческих лицах (пример задачи классификации).

### ABSTRACT

The paper presents theoretical concepts of a neural network methodology for controlling the process of detecting exogenous and endogenous factors of the adaptive system of artificial emotional intelligence to solve problems in the interaction of cognitive dysfunctions with a hardware-software complex during psycho-emotional diagnostics with the possibility of self-regulation using non-drug means. Using Python 3 in Visual Studio Code to describe, train and test an artificial neural network for recognizing emotions on human faces (an example of a classification problem).

**Ключевые слова:** нейросетевая методология, процесс детекции экзогенных и эндогенных факторов, система искусственного эмоционального интеллекта

**Keywords:** neural network methodology, detection process of exogenous and endogenous factors, artificial emotional intelligence system

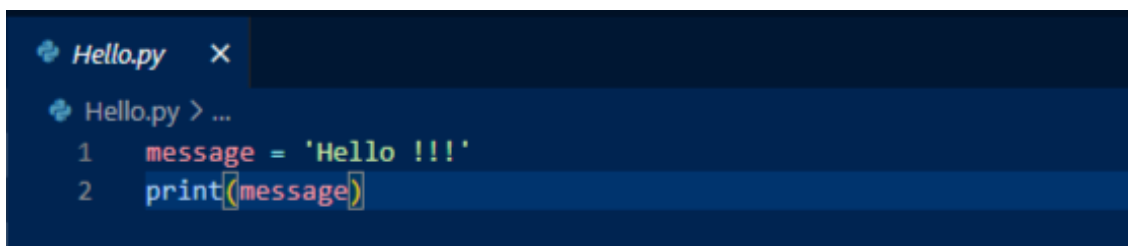
Нейросетевая методология управления процессом детекции экзогенных и эндогенных факторов адаптивной системы искусственного эмоционального интеллекта предназначена для решения проблем в задачах взаимодействия когнитивных дисфункций с аппаратно-программным комплексом во время психоэмоциональной диагностики с возможностью саморегуляции безмедикаментозными средствами. В этой методологии рассмотрено, как использовать Python 3 в Visual Studio Code для описания, обучения и тестирования искусственной нейронной сети по распознаванию эмоций на человеческих лицах (пример задачи классификации).

Предварительные действия. Для начала работы потребуется следующее программное обеспечение: Python3; Visual Studio Code; VS Code Python extension. Интерпретатор Python для Windows можно загрузить на странице: <https://www.python.org/downloads/>. Сведения по установке расширения Python можно найти на странице: <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=ms-python.python>.

После установки необходимого программного обеспечения нужно создать папку проекта (например, HELLO) и открыть ее в редакторе VS Code. Затем в меню File нужно выбрать пункт New File и указать имя создаваемого файла, например,

Hello.py (Рисунок 1). VS Code автоматически откроет этот файл в редакторе. В этот файл нужно добавить какой-либо текст, сохранить (Ctrl - S) и

запустить его, нажав кнопку воспроизведения в правом верхнем углу (или выбрав пункт “Run Python File in Terminal” всплывающего меню):



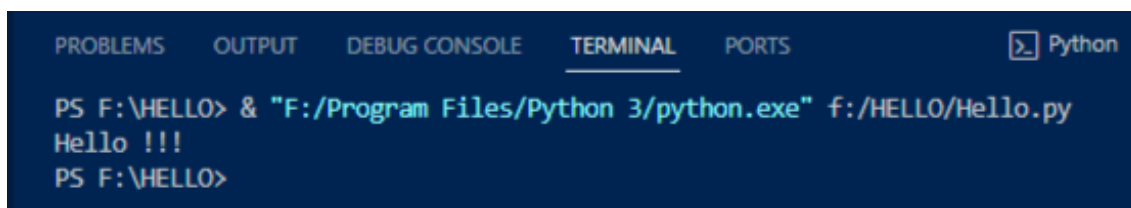
```

Hello.py x
Hello.py > ...
1 message = 'Hello !!!'
2 print(message)

```

Рисунок 1 – Создание проекта

В окне терминала отображается результат работы программы (Рисунок 2).



```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS Python
PS F:\HELLO> & "F:/Program Files/Python 3/python.exe" f:/HELLO/Hello.py
Hello !!!
PS F:\HELLO>

```

Рисунок 2 – Отображение результата работы программы

Необходимые Python – библиотеки. Keras – библиотека Python, предназначенная специально для упрощения процесса создания нейронных сетей. Особенно она подходит тем разработчикам, кто только начинает изучение алгоритмов глубокого обучения. Keras предоставляет пользователю понятный высокоуровневый API. Низкоуровневые вычисления обеспечиваются backend-движками (платформами для машинного

обучения), самые распространенные варианты – TensorFlow и Theano.

Для установки TensorFlow можно воспользоваться описанием, приведенным на сайте:

<https://timeweb.com/go?url=https%3A%2F%2Fwww.tensorflow.org%2Finstall%2F&hash=f91d4c75c3b107f80488dc89ae79d25c0c52c684>

После этого можно одной командой в терминале VS Code установить Keras (Рисунок 3).



```

PS F:\HELLO> pip install keras

```

Рисунок 3 – Установка Keras в терминале VS Code

Keras предоставляет средства для описания модели нейронной сети, составляющих ее слоев, методы обучения с различными алгоритмами оптимизации, средства обработки и преобразования обучающих выборок.

OpenCV – библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и других алгоритмов общего назначения. Как установить библиотеку, описано на сайте: [https://gregorkovalcik.github.io/opencv\\_contrib/tutorial\\_windows\\_install.html](https://gregorkovalcik.github.io/opencv_contrib/tutorial_windows_install.html)

Кроме того, для работы понадобятся следующие библиотеки (можно установить с помощью команды pip install): pandas – удобное средство для обработки табличных данных и создания графиков; matplotlib – библиотека для создания статических, анимированных и интерактивных визуализаций на Python, отображение графиков и рисунков; seaborn – средства визуализации данных; os – модуль для работы с файловой системой компьютера; numpy – пакет для работы с многомерными массивами;

sklearn – реализация различных алгоритмов машинного обучения; в данном случае используется для подготовки данных перед обучением (разделение данных на тестовую, обучающую и валидационную выборки) и расчета различных метрик для оценки качества построенной модели.

Изображения для обучения нейронной сети. Наборы изображений для обучения нейронной сети есть в открытом доступе, например, на Kaggle.com. Kaggle – это международная платформа, которая изначально создавалась для проведения соревнований по Data Science, но к настоящему времени имеет много других дополнительных возможностей по обмену опытом и информацией между разработчиками.

Несколько вариантов наборов фотографий человеческих лиц с отражением на них различных эмоций также можно найти на сайте Kaggle. Например, набор FER-2013 (более 28 тысяч черно-белых изображений размера 48x48), affectnet (около 29 тысяч цветных фотографий 96x96 в форматах

JPEG и PNG, лица на фотографиях отражают одну из семи базовых эмоций или нейтральное выражение).

В данной методологии описан пример, где для обучения нейронной сети использовался преобразованный и дополненный набор фотографий affectnet. На исходных изображениях выделена область лица, изображение преобразовано к черно-белому виду и размеру

64x64. Для расширения набора и повышения сбалансированности к выборке были добавлены фотографии лиц с четко определяемыми на них эмоциями. Набор данных содержит изображения лиц с эмоциями гнева, презрения/пренебрежения, отвращения, страха, радости, печали, удивления и лиц с нейтральным выражением. Подготовка обучающей выборки (Рисунок 4)

```
import os
import cv2
import numpy as np

EMOTIONS = [f.name for f in os.scandir(INPUT_PATH) if f.is_dir()]
IMAGE_SIZE = (64, 64)

X, y = [], []
from os import path

from keras.utils import to_categorical

def my_load_images(input_path, emotions, image_size):
    for index, emotion in enumerate(emotions):
        for filename in os.listdir(os.path.join(input_path, emotion)):
            img = cv2.imread(os.path.join(input_path, emotion, filename),
                             cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
            img = cv2.resize(img, image_size)
            img = img.astype('float32') / 255.0 # Normilize
            X.append(img)
            y.append(index)
    return X, y

my_load_images(INPUT_PATH, EMOTIONS, IMAGE_SIZE)
```

*Рисунок 4 – Подготовка обучающей выборки*

Здесь EMOTIONS – список папок в исходном каталоге, содержащих изображения, распределенные по классам; IMAGE\_SIZE – размер изображения, к которому преобразуются фотографии исходной обучающей выборки;

cv2.imread – чтение изображения из файла; cv2.IMREAD\_GRAYSCALE – флаг, показывающий, что изображение при чтении приводится к оттенкам серого; cv2.resize – изображение преобразуется к нужному размеру.

```
X = np.array(X)
y = to_categorical(np.array(y))
X = np.expand_dims(X, axis=3)
```

*Рисунок 5 – Преобразования для алгоритма обучения модели*

Здесь np.array – преобразование к массиву; to\_categorical и np.expand\_dims – преобразование входных данных к виду, которого требует алгоритм обучения модели (Рисунок 5).

X – массив изображений размерности (N, 64,64) преобразуется к размерности (N, 64,64,1); y – вектор меток классов (0 – гнев, 1 – презрение, 2 –

отвращение, 3 – страх, 4 – радость, 5 – нейтральное выражение, 6 – печаль, 7 – удивление) с длиной N преобразуется в матрицу (N, 8) – каждый из N элементов содержит массив из 8 чисел (по числу классов), где единица – в позиции, соответствующей номеру класса для данного изображения, в остальных позициях нули.



```

from sklearn.model_selection import train_test_split

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3,
                                                    random_state=123)
X_test, X_val, y_test, y_val = train_test_split(X_test, y_test,
                                                test_size=0.17, random_state=123)

```

Рисунок 6 – Функциональное моделирование

Функция `train_test_split` делит выборку (X, y) на части в заданном отношении. `X_train`, `y_train`, `X_test`, `y_test` используются при обучении модели, `X_val`, `y_val` – при проверке качества полученной модели (Рисунок 6).

Описание модели нейронной сети. Библиотека `keras` предоставляет множество средств для описания и обучения нейронной сети (Рисунок 7).

```

from keras.models import Sequential
from keras.layers import Conv2D, Dropout, Flatten, Dense, MaxPool2D
from keras.layers import BatchNormalization
from keras.regularizers import l2
from keras.optimizers import Adam

input_shape = X[0].shape
model_4 = Sequential()

model_4.add(Conv2D(32, (3,3), padding = 'same', activation="selu",
                  input_shape=input_shape))
model_4.add(BatchNormalization())
model_4.add(MaxPool2D(pool_size=(2,2)))
model_4.add(Dropout(0.3))

model_4.add(Conv2D(64, (3,3), padding = 'same', activation="selu"))
model_4.add(BatchNormalization())
model_4.add(Conv2D(64, (3,3), padding = 'same', activation="selu"))
model_4.add(BatchNormalization())
model_4.add(MaxPool2D(pool_size=(2,2)))
model_4.add(Dropout(0.4))

model_4.add(Flatten())
model_4.add(Dense(128, activation='selu', kernel_regularizer=l2(0.01)))
model_4.add(BatchNormalization())
model_4.add(Dropout(0.5))
model_4.add(Dense(8, activation='softmax'))

```

Рисунок 7– Фрагмент описания свёрточной нейронной сети

Выше приведен фрагмент описания свёрточной нейронной сети. Архитектура сети может быть различной, подбирается на основе опыта, собственного или других разработчиков, экспериментальным путем выбирается лучший вариант. Сеть обязательно должна содержать слои, реализующие операцию свёртки, субдискретизирующие слои и на выходе – полносвязные слои, обеспечивающие классификацию.

Класс `Sequential` представляет собой линейный стек слоев сети. Его метод `add` добавляет очередной слой к модели. Параметрами метода являются тип и параметры слоя (`Conv2D` – свёрточный слой, `BatchNormalization` – batch-нормализация, `Dropout` – убирает из расчета некоторое число случайных нейронов, `MaxPool2D` – слой объединения данных или субдискретизации, уменьшает размер изображения, `Flatten` – преобразование

многомерных массивов в одномерные, Dense – обычный полносвязный слой).

После того как структура модели задана, необходимо настроить процесс обучения с помощью метода `compile` (Рисунок 8):

```
model_4.compile(optimizer=Adam(learning_rate=0.01),  
               loss='categorical_crossentropy', metrics=['accuracy'])  
  
model_4.summary()
```

*Рисунок 8 – Процесс обучения с помощью метода `compile`*

Аргументы метода `compile`: `optimizer` – вариант алгоритма оптимизатора (здесь используется оптимизатор Adam с коэффициентом скорости обучения  $\text{lr}=0.01$ ); `loss` – параметр, который минимизируется в ходе обучения, в

данном случае – кросс-энтропия; `metrics` – метрики, используемые для мониторинга обучения.

Метод `summary` печатает текстовое резюме, где по каждому слою выводится его имя и тип, размерность выходной информации и число весовых коэффициентов каждого слоя:

```

Model: "sequential"
-----
Layer (type)                Output Shape                Param #
-----
conv2d (Conv2D)             (None, 64, 64, 32)        320
batch_normalization (Batch  (None, 64, 64, 32)        128
Normalization)
max_pooling2d (MaxPooling2  (None, 32, 32, 32)        0
D)
dropout (Dropout)          (None, 32, 32, 32)        0
conv2d_1 (Conv2D)          (None, 32, 32, 64)        18496
batch_normalization_1 (Bat  (None, 32, 32, 64)        256
chNormalization)
conv2d_2 (Conv2D)          (None, 32, 32, 64)        36928
conv2d_6 (Conv2D)          (None, 8, 8, 256)         590080
batch_normalization_6 (Bat  (None, 8, 8, 256)         1024
chNormalization)
max_pooling2d_3 (MaxPoolin  (None, 4, 4, 256)         0
g2D)
dropout_3 (Dropout)        (None, 4, 4, 256)         0
flatten (Flatten)          (None, 4096)               0
dense (Dense)              (None, 128)                524416
batch_normalization_7 (Bat  (None, 128)                512
chNormalization)
dropout_4 (Dropout)        (None, 128)                0
dense_1 (Dense)            (None, 8)                  1032
=====
Total params: 1692104 (6.45 MB)
Trainable params: 1689992 (6.45 MB)
Non-trainable params: 2112 (8.25 KB)

```

Обучение модели на наборе изображений (Рисунок 9).

```
from keras.callbacks import EarlyStopping, ReduceLROnPlateau, ModelCheckpoint
history = model_4.fit(X_train, y_train, batch_size=128,
                    epochs=50,
                    validation_data=(X_test, y_test),

                    callbacks = [EarlyStopping(patience=10, monitor='val_loss',
                                             mode='min'),
                                ReduceLROnPlateau(monitor='val_loss',
                                                  factor=0.5,
                                                  patience=2,
                                                  verbose=1),

                                ModelCheckpoint(path_model,
                                              save_best_only=True,
                                              save_weights_only=True,
                                              monitor='val_accuracy',
                                              mode='max')],

                    verbose=1)

model_4.save('model_name.h5')
```

*Рисунок 9 -- Обучение модели на наборе изображений*

Метод `fit` выполняет обучение модели. Входными параметрами его являются тренировочный набор `X_train` с метками классов `y_train`, валидационный набор `X_test` с метками `y_test`, размер пакета `batch_size`, число итераций (эпох).

В приведенном примере вызова метода используются следующие колбэки: `EarlyStopping` позволяет закончить процесс обучения раньше заданного числа эпох, если заданный критерий (`'val_loss'`) перестает уменьшаться; `ReduceLROnPlateau` при определенных условиях уменьшает значение коэффициента скорости

обучения; `ModelCheckpoint` в данном случае сохраняет в ходе обучения значения весовых коэффициентов, соответствующие лучшим значениям требуемого параметра (`'val_accuracy'`).

Метод `fit` возвращает объект `history`, который позволяет увидеть изменение значений `accuracy`, `val_accuracy`, `loss`, `val_loss` в процессе обучения от эпохи к эпохе. Удобную визуализацию полученных данных можно реализовать с помощью методов модуля `matplotlib.pyplot`: `plot()`, `show()`, `legend()`. Пример графического представления изменяющихся в ходе обучения показателей на рисунке 10:

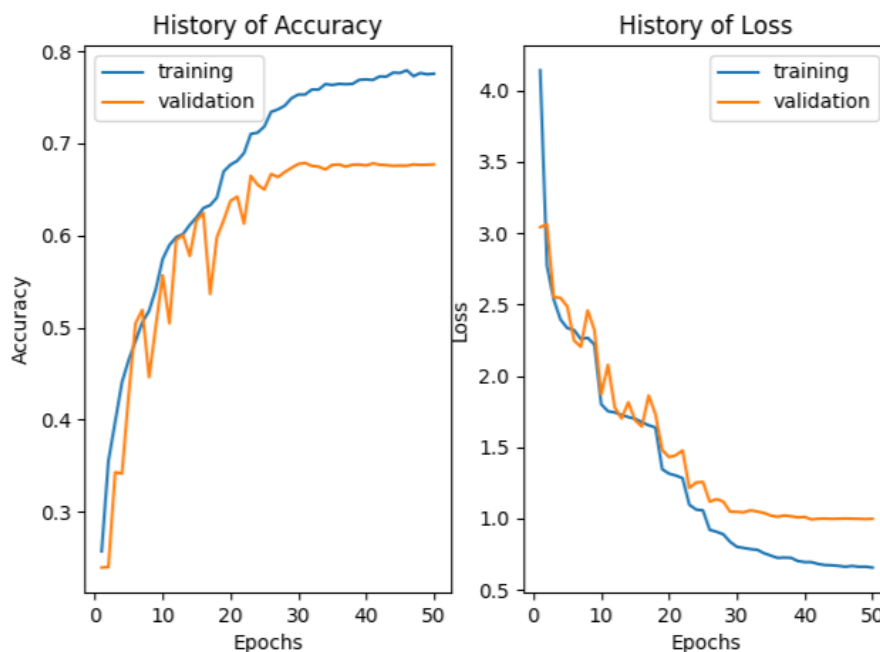
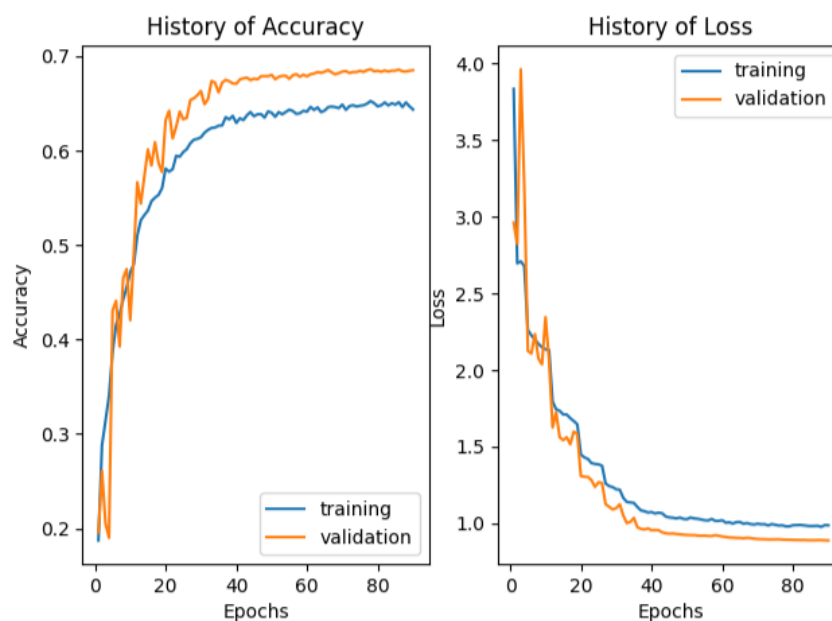


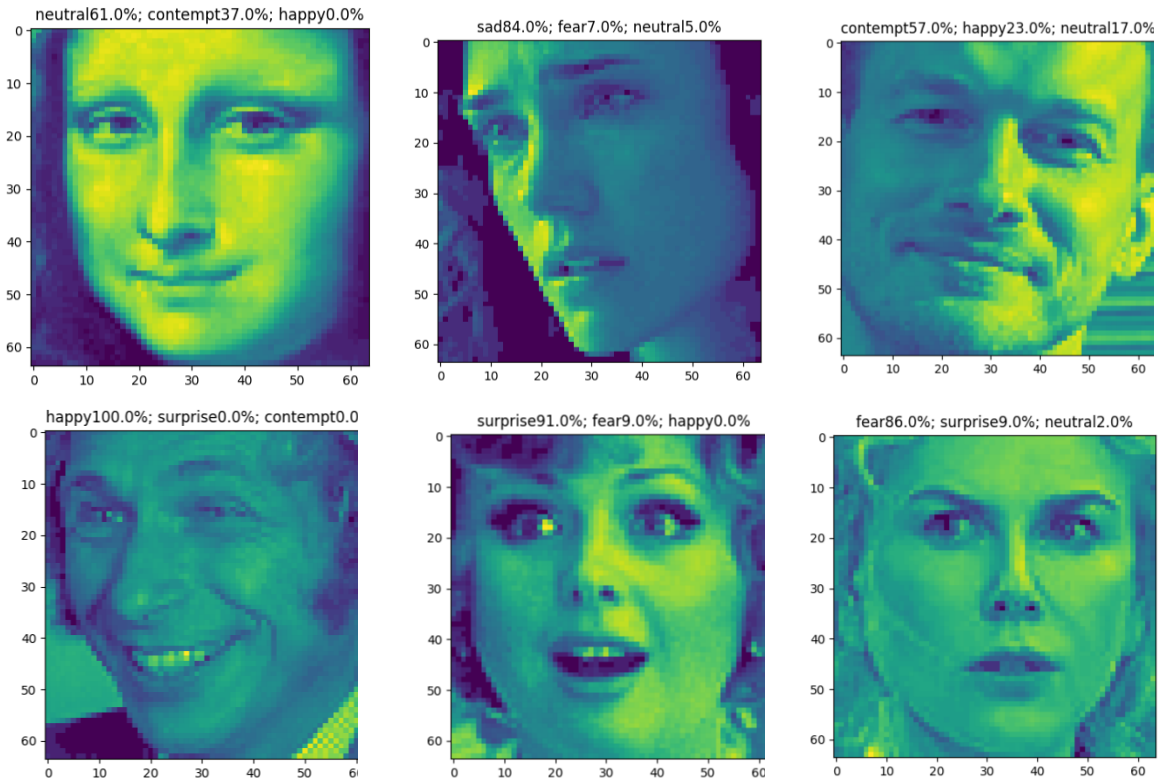
Рис. 10 – Пример графического представления изменяющихся в ходе обучения показателей

Кроме метода `fit()`, для обучения модели используют также метод `fit_generator()`. Он применяется в тех случаях, когда обучающий набор слишком большой, чтобы поместиться в память целиком, или же если требуется расширение данных. Для сравнения на рисунке приводится изменение значений `loss` и `accuracy` в процессе обучения модели методом `fit_generator`.

По окончании обучения метод `save` сохраняет полученные значения весовых коэффициентов в заданный файл. Оценка качества полученной модели. Есть несколько способов оценить качество полученных моделей для сравнения их между

собой. Метод `evaluate` класса `Sequential` рассчитывает значения `loss` и `accuracy` для тестовой выборки (набор данных, который для обучения модели не применялся). Метод `Sequential.predict()` рассчитывает для каждого изображения лица человека вероятности присутствия на лице каждой из восьми эмоций. При этом в качестве входного параметра методу передается массив изображений, подготовленных тем же способом, как для обучения модели. Результаты прогноза приведены на рисунке. Эмоции, определенные моделью, приведены в порядке убывания вероятности (Рисунок 10).

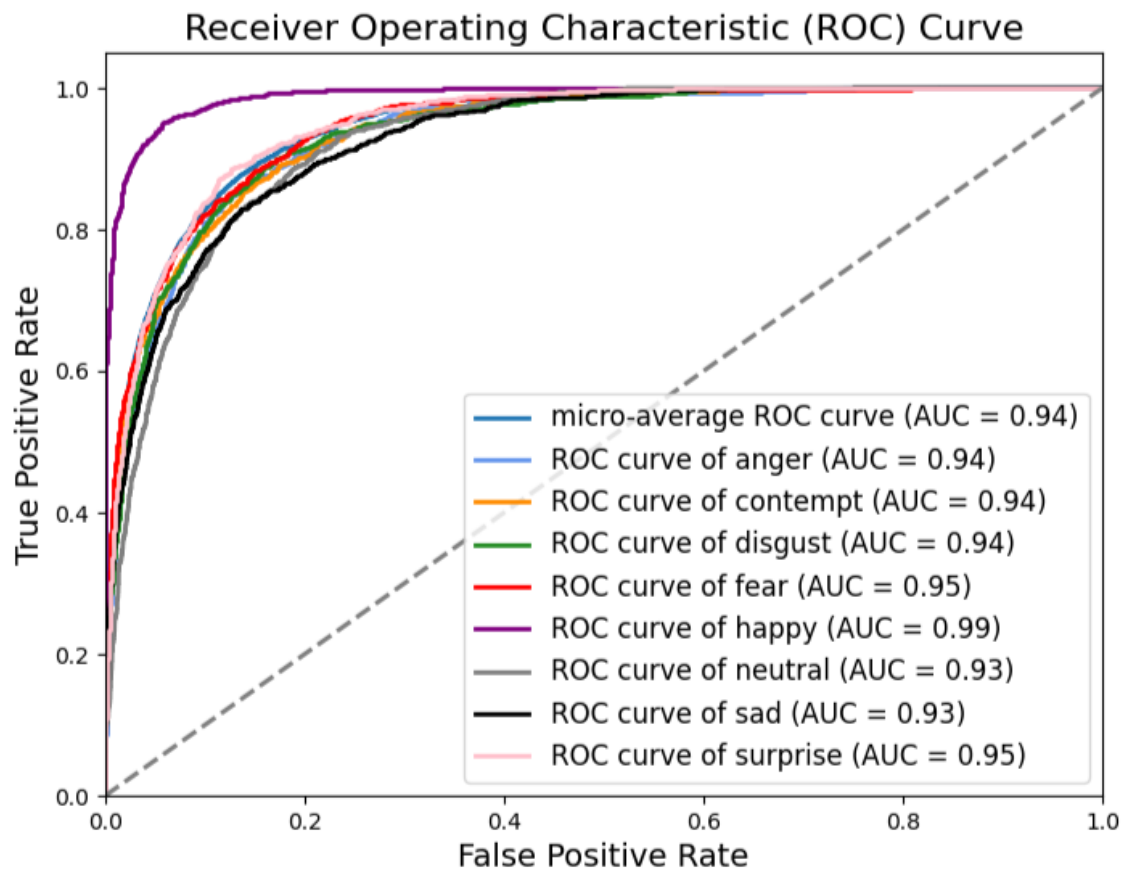




*Рисунок 11 – Результаты экспериментальных исследований*

Еще один из вариантов – ROC-кривая, описывающая взаимосвязь между чувствительностью модели (долей истинно положительных результатов прогноза TPR) и ее

специфичностью  $1 - \text{FPR}$  (доли ложноположительных результатов). Визуализация ROC-кривой для приведенной модели на рисунке 12.



*Рисунок 12— Визуализация ROC-кривой*

Чем выше значение AUC и чем дальше кривая от диагонали графика, тем выше качество модели. Расчет и визуализация ROC-кривой реализованы с использованием модулей `sklearn.metrics` и `matplotlib.pyplot`. Кроме того, в модуле `sklearn.metrics` реализованы удобные методы для оценки качества модели: `classification_report` и `confusion_matrix`.

Метод `classification_report` рассчитывает метрики: `precision` - точность, `recall` - отклик и `f1-score` - гармоническое среднее точности и отклика:

$$f1score = 2 \cdot \frac{precision \cdot recall}{precision + recall}$$

Результаты расчета метрик для приведенного выше случая:

	precision	recall	f1-score	support
0	0.67	0.62	0.64	988
1	0.65	0.66	0.66	916
2	0.67	0.63	0.65	907
3	0.75	0.59	0.66	895
4	0.87	0.87	0.87	1143
5	0.58	0.66	0.62	1067
6	0.62	0.65	0.64	1011
7	0.68	0.74	0.71	1204
accuracy			0.69	8131
macro avg	0.69	0.68	0.68	8131
weighted avg	0.69	0.69	0.69	8131

Здесь приведены значения метрик для каждого класса в отдельности, а также их средние и средневзвешенные значения. Метод `confusion_matrix` рассчитывает матрицу ошибок, в которой столбцами являются реальные значения классов, а строками – предсказанные моделью. То

есть диагональ отражает случаи, когда предсказанный и реальный класс совпадают. Рассчитанные числовые коэффициенты матрицы ошибок визуализируются средствами модуля `matplotlib.pyplot`:



# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.9

---

## ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА СТАНКОВ С ЧПУ

---

*Емельянова И.В.**Самарский государственный технический университет,  
Россия, 443099, г. Самара, Молодогвардейская, 244*

### IMPROVING THE DYNAMIC QUALITY OF CNC MACHINES

*I V Yemelyanova**Samara State Technical University,  
Russia, 443099, Samara, Molodogvardeyskaya street, 244**DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.114.1.1915*

#### АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены вопросы обеспечения точности обработки на станках с ЧПУ на основе инновационных методов моделирования и проектирования станочной системы, приводов и протекающих процессов в станке. Топологический метод анализа заключается в изображении системы в виде графо-блочной-матричной модели ГБММ, имеющей различную степень детализации при переходе от верхнего иерархического уровня к низшему. Метод сочетает преимущества расчетов на основании теории графов, эффективных методов декомпозиции, обладает наглядностью, присущей как топологическим моделям, так и структурным матрицам системы и вооружен мощным аппаратом линейной алгебры - матричного метода исследования. Рассматриваемые автоматизированные станочные комплексы, системы, устройства, узлы, проектирование которых можно условно разбить на взаимосвязанные части, могут быть представлены алгебраическими, топологическими и теоретико - множественными моделями. Каждая из моделей может быть эквивалентно преобразована в модель другого вида и в итоге, выражена в виде совокупности систем линейных и нелинейных уравнений, решение которых позволяет определить параметры системы. Приведены результаты анализа динамических параметров станка модели 1716ПФ4 на этапах проектирования и эксплуатации. Проведенные исследования влияния динамических явлений системы на показатели качества детали позволили разработать и внедрить ряд практических рекомендаций. Что позволило существенно снизить уровень амплитуд относительных колебаний, исключить ряд резонансных зон в диапазоне частот вращения шпинделя 0...6000 мин<sup>-1</sup> и повысить точность обработки.

#### ABSTRACT

The article considers achieving the machining accuracy of CNC machines by applying innovative methods in modelling and design of machining systems, drives and machine processes. The topological method of analysis involves visualizing the system as matrices of block graphs with a varying degree of detail between the upper and lower hierarchy levels. This approach combines the advantages of graph theory and the efficiency of decomposition methods, it also has visual clarity, which is inherent in both topological models and structural matrices, as well as the resiliency of linear algebra as part of the matrix-based research. The focus of the study is on the design of automated machine workstations, systems, machines and units, which can be broken into interrelated parts and presented as algebraic, topological and set-theoretical models. Every model can be transformed into a model of another type, and, as a result, can be interpreted as a system of linear and non-linear equations which solutions determine the system parameters. This paper analyses the dynamic parameters of the 1716PF4 machine at the stages of design and exploitation. Having researched the impact of the system dynamics on the component quality, the authors have developed a range of practical recommendations which have enabled one to reduce considerably the amplitude of relative motion, exclude some resonance zones within the spindle speed range of 0...6000 min<sup>-1</sup> and improve machining accuracy.

**Ключевые слова:** станок, шероховатость, топологический анализ, динамическая система, вибрация

**Keywords:** machine tool, roughness, topological analysis, dynamic system, vibration

#### Введение

Решение задачи обеспечения шероховатости поверхности заключается в установлении взаимосвязи параметров шероховатости с условиями обработки. Данными вопросами занимались А.П. Соколовский, А.И. Исаев, А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный и др. Для отыскания искомой взаимосвязи использовались как теоретические, так и эмпирические расчетные зависимости. Как показывают исследования для

надежного обеспечения шероховатости поверхности необходимо учитывать динамическое состояние технологической системы.

Недостаточный учет этих связей, как правило, ведет к быстрой потере точности станка, снижению производительности, надежности и качества обработки.

Теоретическое исследование заключается в составлении и решении математической модели при соответствующем выборе ее описания: во



временном, частотном или операторном представлении протекающих процессов и явлений в системе.

Так, например, при исследовании системы на переходных режимах используют временное представление происходящих процессов в системе с помощью систем дифференциальных или интегральных уравнений [1,3,4,7].

#### Цель исследования

На установившихся режимах применяют частотное представление, связанное с разложением периодической функции времени  $g\{t\}$  с периодом  $T$  в ряд Фурье и получением частотного спектра и значениями амплитуд каждой гармоники.

Первоначальное представление системы на основании положения ТАР и ТАУ в виде структурной блок-схемы с дальнейшей детализацией при переходе от высшего уровня иерархии к низшему, требует разработки структурных схем или топологических моделей, или представление и решение системы матричными методами. Общим недостатком указанных методов для описания многосвязных систем большой размерности является их чрезвычайная сложность, громоздкость и трудная обозримость, являющаяся одним из основных затруднений при проектировании.

Поиски новых более эффективных методов представления и комплексного изучения сложных станочных систем, рассматриваемых как замкнутые динамические системы различной физической природы, с учетом многообразия связей, внешних и внутренних силовых факторов и воздействий на элементы системы, привели к методу, излагаемому ниже [1,2,4].

Сущность данного метода заключается в изображении системы в виде графо-блочной матричной модели ГБММ, имеющей различную степень детализации при переходе от верхнего иерархического уровня к низшему.

Данный метод сочетает преимущества расчетов на основании теории графов, эффективных методов декомпозиции, обладает наглядностью, присущей как топологическим моделям, так и структурным матрицам системы и вооружен мощным аппаратом линейной алгебры - матричного метода исследования, сравнительно легко поддается алгоритмизации и расчету на ЭВМ.

Простейшими элементами станочной системы являются функциональные элементы: электродвигатели, передаточные механизмы, корпусные узлы - для электромеханической системы станка; транзисторы, диоды, резисторы, интегральные узлы и др. - для системы ЧПУ и АСУ приводов.

#### Методы исследования

Определенная последовательность элементов системы образует кинематические, электрические, гидравлические и др. цепи, по которым осуществляется передача, преобразование энергии (силовая часть станочной системы) или передача сигналов и их преобразование (электрическая, электронная часть станка - система управления).

Совокупность указанных цепей вместе с корпусными узлами (несущая система станка), выполненные отдельной сборочной единицей, могут являться узлом (модулем), приводом, станком с ЧПУ, РМ, РТК и т.д.

#### Результаты исследования

Таким образом, рассматриваемые автоматизированные станочные комплексы, системы, устройства, узлы являются физическими сложными системами, проектирование которых можно условно разбить на следующие взаимосвязанные части: проектирование цепей и проектирование конструкций, которые могут быть представлены алгебраическими, топологическими и теоретико - множественными моделями. Каждая из моделей может быть эквивалентно преобразована в модель другого вида и в итоге, выражена в виде совокупности систем линейных и нелинейных уравнений, решение которых позволяет определить параметры системы.

Рассмотрим систему неоднородных уравнений в матричной форме

$$[A]\{x\} = [H]\{f\},$$

или в развернутом виде

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = h_{11}f_1,$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = h_{22}f_2,$$

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = h_{nn}f_n$$

Если принять, полагая  $a_{ij}(p)$ ,  $h_{ik}(p)$  полиномами  $p = d/dt$ , причем  $a_{ij}(p)$  имеют порядок не выше второго

$$a_{ij}(p) = m_{ij}p^2 + n_{ij}p + l_{ij},$$

то получим систему дифференциальных уравнений в символьном виде

Запишем систему следующим образом

$$a_{ii}x_i = \Sigma (-a_{ij})x_j + h_{if}f_i \quad i = 1, 2, \dots, n; i = j;$$

или для общего случая

$$a_{ii}x_i = \Sigma (-a_{ij})x_j + \Sigma h_{ik}f_k \quad i = 1, 2, \dots, n; i = j;$$

Если разрешить каждое уравнение системы относительно главной переменной, то система приводится к виду

$$x_i = \Sigma (-a_{ij}/a_{ii})x_j + (h_{if}/a_{ii})f_i \quad i = 1, 2, \dots, n; i = j;$$

Последнее выражение системы отображается сигнальным обобщенным графом, топологической структуры, включающей в себя [2,4,6,7]:

совокупность вершин  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , каждая из которых соответствует искомой переменной  $x_i$  и имеет вес  $a_{ii}$ , определяемый коэффициентом при данной переменной в левой части  $i$ -го уравнения системы;

совокупность вершин-истоков  $f_i$ ;

совокупность дуг  $\{x_i, x_j\}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ , каждая из которых направлена в вершину  $x_i$  из вершины  $x_j$  и имеет вес  $(-a_{ij})$ , определяемый

коэффициентом при  $j$ -й переменной в правой части  $i$ -го уравнения системы.

Указанная структура имеет следующие достоинства:

- простота определения знака слагаемых в топологической формуле передачи, который зависит от четности числа не касающихся контуров;

- непосредственное соответствие системе уравнений, записанной в общем виде.

Представим систему в виде ЕБММ - топологической структуры (рис. 1), обладающей наглядностью, свойственной структурным схемам, и детальностью прохождения сигналов, информационных или энергетических потоков.

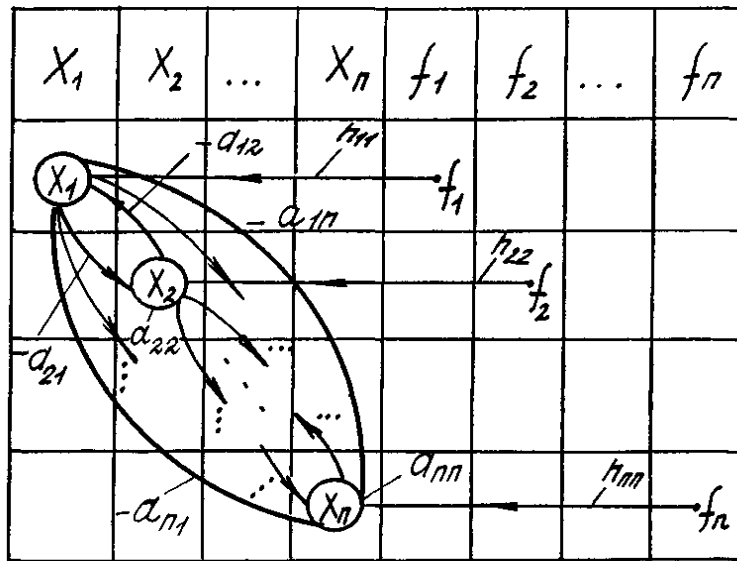


Рис. 1. Упорядоченное представление топологической структуры системы

Согласно теории графов и приложений, каждый недиагональный элемент  $-a_{ij}$  характеризует передачу воздействия от координаты  $-x_j$  на координату  $-x_i$ , а диагональные элементы  $a_{ii}$  отображают собственные свойства объекта по каждой отдельно взятой координате  $-x_i$ . При этом линия передачи идет от одного диагонального элемента к другому по правилу хода против часовой стрелки - "сверху вниз - направо", снизу - вверх - налево".

Воздействия элементов правой части системы уравнений передаются непосредственно на диагональные элементы.

Физический смысл топологического анализа, состоящего в изучении структурной организации системы и выявлении роли составляющих ее элементов (узлов, звеньев, подсистем) на свойства системы.

Топологические понятия (путь, контур, инцидентность, передача, определитель и др.) и свойства модели позволяют:

сделать один из важнейших выводов об устойчивости системы (система устойчива тогда и

только тогда, когда устойчива контурная часть и все дуги, не входящие в нее);

выявить влияние на динамические характеристики системы отдельных ее элементов путем выражения передаточных функций и параметров операторов дуг в результате подстановки их в формулы типа Мэсона;

по определителю топологической модели, представленной произведением определителей автономных контурных частей и дуг, не входящих в контуры - исследовать устойчивость и быстродействие системы.

При этом определение запаса устойчивости производится отдельно для каждой автономной части, что позволяет определить, какая контурная часть (подсистема, узел станка) в наибольшей мере влияют на показатели устойчивости и качества системы. Эта часть и должна подвергаться в первую очередь изменениям, а в случае необходимости - ее объединяют с другими частями системы дугами коррекции, на практике выражаемыми механическими и немеханическими связями.

Для токарного станка с ЧПУ типа 1716ПФ3 динамическая система, состоящая из несущей

системы, привода главного движения и подач может быть представлена обобщенным сигнальным графом, состоящем из трех

нелинейных элементов, описываемых функционалами  $k_1, k_2, k_3$  и матрицей связей [В].

Определитель графа такой системы имеет вид:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 - K_{11}B_{11} - K_2B_{12} - K_3B_{13} \\ -K_1B_{21} \dots 1 - K_2B_{22} - K_3B_{23} \\ -K_1B_{31} \dots -K_2B_{32} \dots 1 - K_3B_{33} \end{vmatrix} \\ = K_1K_2K_3 \left( \frac{1 - K_1B_{11}}{K_1} \cdot \frac{1 - K_2B_{22}}{K_2} \cdot \frac{1 - K_3B_{33}}{K_3} - \frac{1 - K_1B_{11}}{K_1} B_{23} \cdot B_{31} - \frac{1 - K_2B_{22}}{K_2} \cdot B_{13}B_{31} - \frac{1 - K_3B_{33}}{K_3} B_{21}B_{12} - B_{12}B_{23}B_{31} \right)$$

При  $\Delta=0$  находится граница устойчивости рассматриваемой сложной динамической системы, которой могут быть присущи такие динамические свойства, которые не наблюдаются в отдельно рассматриваемых подсистемах.

Так, например, согласно ряда исследований зависимость коэффициента трения скольжения от скорости скольжения  $V$ , мм/мин, изменяющейся в пределах 0 - 100 мм/мин, пары фторопласт-чугун практически является постоянной и составляет  $\mu=0,05$ .

Экспериментальные исследования, проведенные авторами, по определению силы трения в направляющих скольжения привода продольных подач станка 1716ПФЗ при различных величинах подач и широком изменении частот вращения привода главного движения показали, что такая закономерность справедлива лишь при малых скоростях скольжения.

Физический смысл этого явления может быть объяснен влиянием уровня вибраций, создаваемых приводом главного движения, передаваемых через несущую систему динамической системы привода подач, прямые и обратные связи которой и обуславливают новые свойства поведения “ползуна”- исполнительного органа станка.

Структура механической части привода, включающая ротор электродвигателя, автоматическую коробку скоростей (редуктор) и шпиндельный узел, может быть приведена к 3-х массовой расчетной модели (рис. 2), параметрами которой являются приведенные моменты инерции -  $I_i$ , движущие и нагрузочные моменты -  $M_i$ , углы поворота упругих звеньев -  $\varphi_i$  (или угловые скорости -  $\omega_i$ ), приведенные податливости -  $1/C_{ij}$  и демпфирование -  $b_{ij}$ .

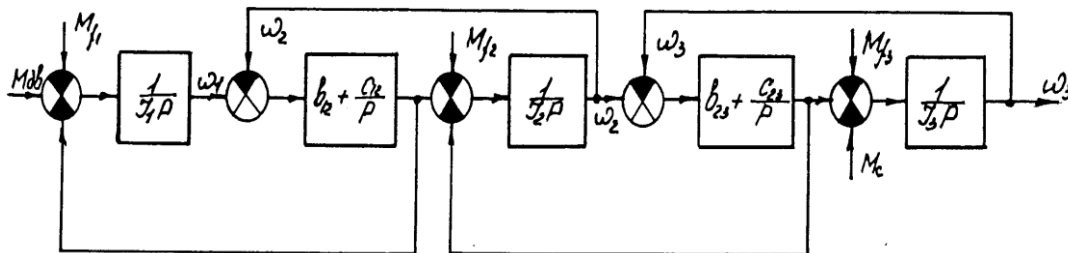


Рис. 2. Структурная блок-схема механической части привода станка

Частотный анализ крутильных колебаний приводов главного движения и подач позволил установить наличие двух областей интенсивности колебаний, одна из которых обусловлена динамикой привода, а вторая - спектром собственных частот деталей суппорта станка, которые оказывают взаимное влияние друг на друга, снижая точность обработки.

Методика теоретических и экспериментальных исследований включают

многовариантный анализ, выполняемый путем многократного моделирования исследуемой системы при различных значениях варьируемых параметров [3]. Что позволяет выявить влияние значимых факторов на получаемый расчетный результат и дать практические рекомендации (с учетом экспериментальных исследований (рис. 3)) для получения оптимального (рационального) варианта конструкции.



Рис.3. График относительных колебаний станка модели 1716ПФ3:

1 - АЧХ с оправкой, закрепленной в конусе шпинделя; 2 - АЧХ с оправкой, закрепленной в патроне

Комплексной динамической характеристикой привода станка является траектория геометрической оси шпинделя в поперечном направлении.

Знание (аналитическое и/или экспериментальное) характерной траектории

перемещения оси вращения шпинделя (токарно-винторезного станка модели 1716ПФ3, 1716ПФ4) и спектрограммы обработанной на нем поверхности детали позволяет установить связь параметров системы с показателями качества детали (рис.4).

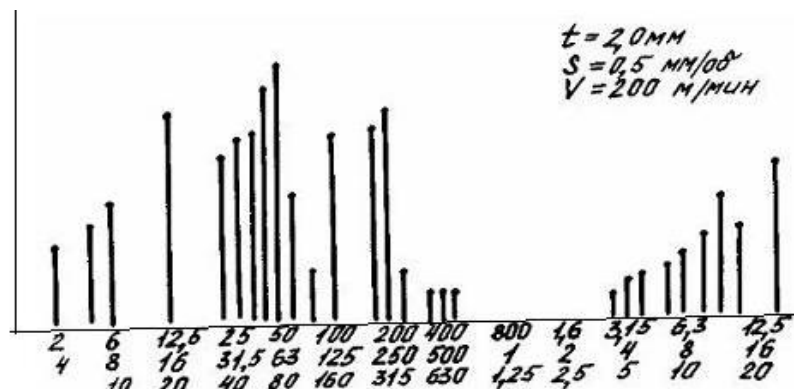


Рис.4. Частотный спектр относительных колебаний станка при резании

### Выводы

Проведенные исследования влияния динамических явлений системы «инструмент-заготовка» на показатели качества детали позволили разработать и внедрить ряд практических рекомендаций, заключающихся, в частности, в повышении жесткости стыка «станина-шпиндельная бабка», в конструктивном изменении и доработке узла зубчатого редуктора, а также в повышении нормативных требований к вращающимся узлам и деталям по статической и динамической балансировке.

Это позволило существенно снизить уровень амплитуд относительных колебаний, исключить ряд резонансных зон в диапазоне частот вращения шпинделя 0...6000 мин<sup>-1</sup> и повысить точность обработки [4].

### Литература

1. Анисимов В. И. Топологический расчет электронных схем. - Л.: Энергия, 1977. - 240 с.
2. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети. - М.: Наука, 1974. - 366 с.
3. Дэвенпорт Дж. и др. Компьютерная алгебра. - М.: Мир, 1991. - 350 с.
4. Емельянов Н.В., Зубенко В.Л. Информационные технологии при анализе и синтезе приводов станков с ЧПУ / Научные труды Межд н-пр конф «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении». М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, ИМАШ РАН, МГПУИ, 2010. - С. 164-169.
5. Коутс Р., Влейминк И. Интерфейс "Человек-компьютер"/ Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. - 501 с.
6. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М. Мир. 1978. - 432 с.

7. Кук Д., Бейз Г. Компьютерная математика. - М.: Наука, 1990. - 384 с.

8. Сещу С., Рид М. Линейные графы и электрические цепи. - М.: Высш. школа, 1971. - 448 с.

9. Уайлд Д. Оптимальное проектирование. - М.: Мир, 1981.- 272 с.

УДК 627/628

---

## РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ

---

**Зборовская Марина Ильинична,**  
доцент кафедры гидротехнических сооружений  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, кандидат технических наук;  
Россия, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49.

**Фартуков Василий Александрович**  
доцент кафедры гидротехнических сооружений  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, кандидат технических наук;  
Россия, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49.

## REGULATION OF TENSION AND ENSURING LONG-TERM STABILITY OF EARTHWORKS

**Zborovskaya Marina Ilyinichna**  
Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures of  
the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
candidate of technical sciences;  
Russia, 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49.

**Fartukov Vasily Alexandrovich**  
Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures of  
the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
candidate of technical sciences;  
Russia, 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49.  
[DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.114.1.1912](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.114.1.1912)

### АННОТАЦИЯ

На сегодняшний день проблема стабилизации склонов остаётся одной из наиболее важных проблем. Существует ряд методов, которые можно использовать для достижения стабилизации склона около храмового комплекса с. Радонеж, Московская область. Выполнено расчётное обоснование мероприятий по восстановлению и поддержанию устойчивости склона (в том числе с применением свай). Разница в коэффициенте безопасности между методом конечных элементов (FEM) и результатами метода предельного равновесия (LEM) невелика, но FEM является отличным инструментом для моделирования нелинейного поведения напряженно-деформированного состояния материалов и понимания стабильности на основе деформаций, в том числе с применением свайного крепления.

### ANNOTATION

Today, the problem of slope stabilization remains one of the most important problems. There are a number of methods that can be used to achieve slope stabilization near the temple complex. Radonezh, Moscow region. A calculation substantiation of measures to restore and maintain slope stability (including the use of piles) has been carried out. The difference in safety factor between the finite element method (FEM) and the limit equilibrium method (LEM) results is small, but FEM is an excellent tool for modeling the nonlinear stress-strain behavior of materials and understanding deformation-based stability, including the use of pile anchorage.

**Ключевые слова:** оползень, стабилизация склона, устойчивость склона, методы расчёта устойчивости, метод конечных элементов, работа свай, MIDAS GTS NX.

**Keywords:** landslide, slope stabilization, slope stability, stability calculation methods, finite element method, pile operation, MIDAS GTS NX.

На сегодняшний день проблема стабилизации склонов остаётся одной из наиболее важных проблем. Весьма важно определять хронически опасные оползневые зоны, которые нужно закреплять. Необходимы доступные технологии для стабилизации оползней высокой вероятности, расположенных в районах с соответствующим геологическим строением.

Факторы по оценке устойчивости склонов включают такие понятия как: рельеф; прочность материалов грунта при создании склона или составляющих тело естественного склона; содержание воды в грунте – относительное количество воды в грунте, покрывающем склон; растительность, покрывающая и / или окружающая область склона.

Важно также отметить необходимость выделения краткосрочной стабильности и долгосрочной стабильности или обеих. Оценить сложение откоса и определить, есть ли потенциал для нарушения устойчивости склона. При анализе долгосрочной стабильности необходимо учитывать качество сложения склона через пять или десять лет, или потенциальные экологические события, которые могут разрушить или изменить состояние грунта.

Существует ряд методов, которые можно использовать для достижения стабилизации склонов, некоторые из которых включают: анкерное крепление – anchor blocking; система стабилизации скольжения micropile – Micropile slide stabilization system; габионы – gabions;

создание стен из плотно соединённых трубных свай или шпунтовых свай из стальных листов; стабилизация откоса за счёт использования стальных грунтовых гвоздей – Soil nailing для поддержки склона и/или инфраструктуры и торкретных стен [1].

Необходимо было выполнить выбор варианта укрепления откоса для противооползневых сооружений около храмового комплекса с. Радонеж, Московская область (рис. 1а). В соответствии с Распоряжением от 22 марта 2014 года, памятник истории и культуры "Древний Радонеж, XIV-XV вв." был включен в список объектов культурного наследия федерального значения.



Рисунок 1. Вид на дом и откос со стороны Афанасова поля (а) после аварии и восстановленный (б).

Оползень (2006 г.) проявился резким смещением вниз прибрежной части откоса в районе хозяйственного двора и на прилегающих к нему участках, а скорость смещения измерялась первыми десятками см в сутки.

Толчок к образованию оползня могли дать как работы на территории дома (2 – дом, 8 – локальное очистное сооружение на рис. 2а), так и возможное попадание воды на откос и увлажнение глинистых грунтов на контакте с песчаным слоем (рис. 2б).

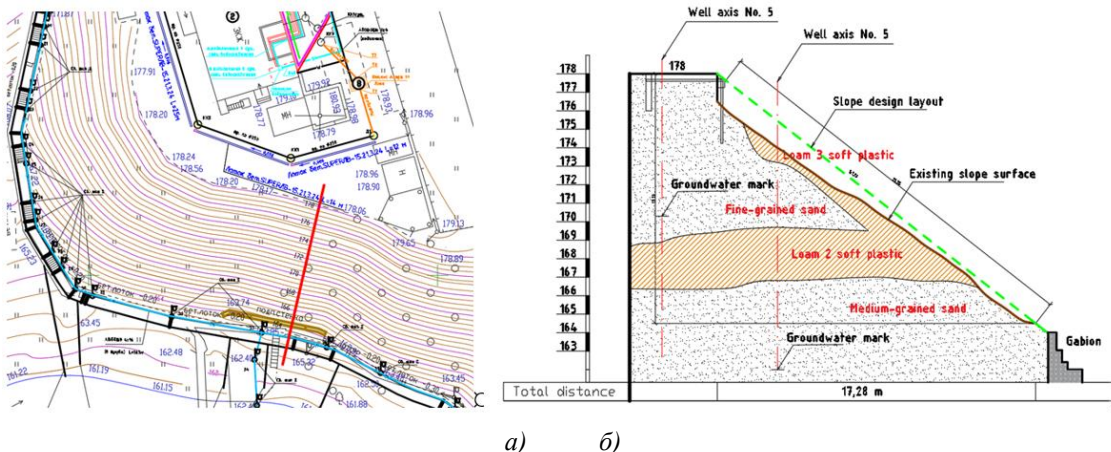


Рисунок 2. а) - план территории, включающий рассматриваемый откос и прилегающие к нему строения: 2 – дом, 8 – локальное очистное сооружение; б) - Инженерно-геологический разрез расчётного сечения (схематизированный для расчёта).

**Расчётное обоснование мероприятий по восстановлению и поддержанию устойчивости склона.**

Расчёт проводился в плоской постановке (2Д), не учёт эффекта пространственности идёт в запас прочности. Положение свободной поверхности

грунта, границы раздела слоёв и УГВ представлены непрерывными кусочно-ломанными линиями, аппроксимирующими инженерно-геологический разрез с заданной точностью (см. рис. 2б).

Также принимались во внимание сооружения, предусмотренные планом благоустройства



территории, включая подпорную стенку из габионов, которая будет возводиться в основании склона. Для повышения устойчивости склона приняты дополнительные меры, такие как укрепление его конструкции или увеличение коэффициента устойчивости.

Для расчётных исследований выделили инженерно- геологические элементы (ИГЭ) –на 15,0 м вглубь современные почвенные образования (solQIV), верхнечетвертичные аллювиальные отложения (aQIII) (см. рис. 2б):

грунт 1- суглинки коричневые, мягкопластичные и тугопластичные с редким включением щебня (2,5-4,8м мощность);

грунт 2- пески мелкие, коричневые, рыхлые и средней плотности, водонасыщенные, с включением щебня до 10%, (1,5-4,4 м мощность);

грунт 3- пески средней крупности, коричневые, рыхлые и средней плотности, водонасыщенные, с включением щебня до 10%, (2,6-5,2 м мощность);

грунт 4- пески крупные, коричневые, средней плотности, водонасыщенные, с включением щебня до 30%, (1,3-3,3 м мощность).

На момент изысканий (июнь 2008 г.) гидрогеологические условия территории характеризуются одним водоносным горизонтом в мелких песках. на абсолютных отметках 164,75-165,20 м. Горизонт является безнапорным. Водоупор не вскрыт. Это позволяет не учитывать действие подземных вод при расчёте устойчивости склонов.

Согласно программам ООО «НТЦ Спецпромгидротэк» в соответствии с нормативными документами (СП 58.13330.2019, 39.13330.2012, СП 23.13330.2018) производился расчёт для определения наиболее опасной поверхности скольжения. Эта поверхность

характеризуется максимальной степенью мобилизации сопротивления сдвигу грунта. Степень мобилизации определяется коэффициентом устойчивости  $K_s = R/F$ , где  $R$  - сопротивление сдвигу грунта, а  $F$  - приложенная нагрузка. Допустимые значения коэффициента устойчивости для основного и особого сочетаний нагрузок равны 1,1 и 1,08 соответственно.

Для расчета устойчивости используются методы Крея, Чугаева и Бишопа. В этих методах предполагается, что при начале обрушения отвердевший отсек грунта ограничивается кругло цилиндрической поверхностью скольжения, на которой достигается предельное равновесие. Зависимость  $\tau_i = \sigma_i \cdot tg\phi_i + C_i$  используется для определения параметров прочности грунта [2].

В указанном ПО используется метод Г. Крея для поиска наиболее опасной поверхности скольжения. Были выполнены расчеты для основного и особого сочетаний нагрузок, результаты которых представлены на рисунках 3а и 3б.

Результаты расчетов показывают, что устойчивость откоса обеспечивается коэффициентом устойчивости  $K = 1,04$ , что больше 1. Однако, данное значение не обеспечивает необходимого запаса в 10%. При особом случае (грузовая машина на гребне откоса) коэффициент устойчивости меньше единицы, что говорит о недостаточной устойчивости откоса в данном сочетании нагрузок. Рекомендуется принять дополнительные меры для повышения устойчивости откоса, например, укрепление конструкции или увеличение коэффициента устойчивости.

Результаты расчётов приведены на рисунках 3а и 3б.

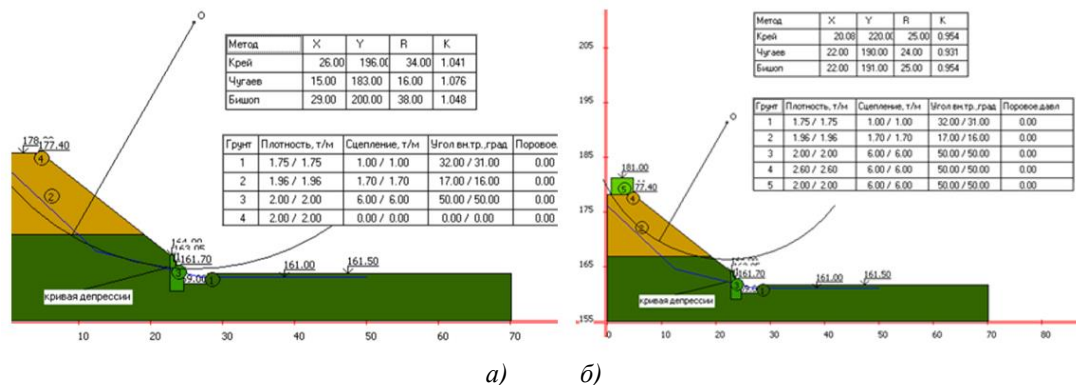


Рисунок 3. Расчет общей устойчивости откоса на территории Преображенской церкви в селе Радонеж. а) - основного случая; б) - особого случая.

В качестве механизмов, которые могут привести к интенсификации оползневых процессов, были обозначены изменения гидрогеологических условий (повышение уровня грунтовых вод при изменении условий питания и разгрузки водоносного горизонта), а также антропогенное изменение профиля склона и почвенного покрова в результате инженерной или

мелиоративной деятельности человека (например, подрезка склона).

Нами было выполнено решение задачи методом конечных элементов (МКЭ) без задания геометрии поверхностей скольжения по программе MIDAS GTS NX [3].

Анализ результатов расчётов показывает, что значения коэффициента устойчивости, полученные

аналитическими расчётами, оказались выше, чем значения, полученные расчётом МКЭ. Говорить о завышении или занижении результатов расчётов не представляется возможным, ввиду отсутствия истинных эталонных значений коэффициента

устойчивости. Тем не менее, рассмотрение склонов с точки зрения строительства подразумевает принятие наименьших значений коэффициента устойчивости (в запас устойчивости склона).

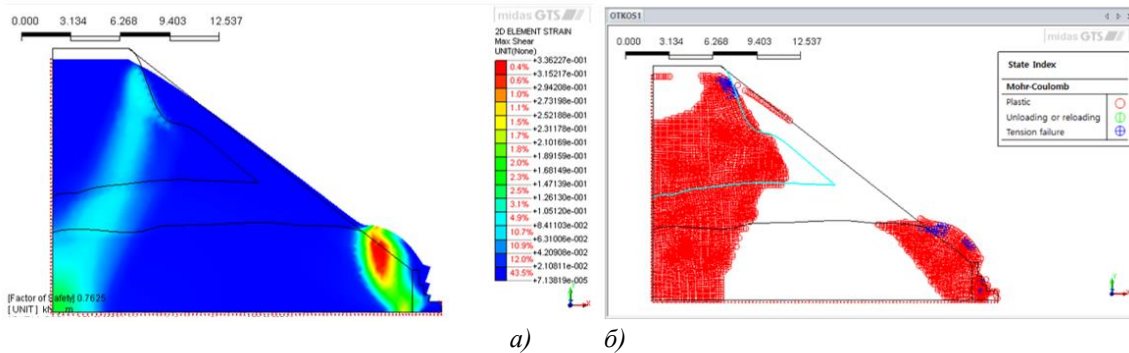


Рисунок 4. Схема максимальных сдвигов грунтов откоса

а) - с показом деформированного состояния (неактуальные деформации, то есть с показом не в масштабе) и потенциальной плоскостью сдвига; б) - развитие зон пластичности и деформированное состояние откоса

Получен коэффициент запаса устойчивости для этого случая для потенциальной плоскости сдвига на рисунке 4 -  $K_{зап.} = 0.7625$ , что говорит о неустойчивости конструкции.

Для повышения устойчивости откоса предложено выполнить расчёт устойчивости откоса с учётом наличия металлических свай для повышения прочности откосного сооружения – рис. 5 [4÷9].

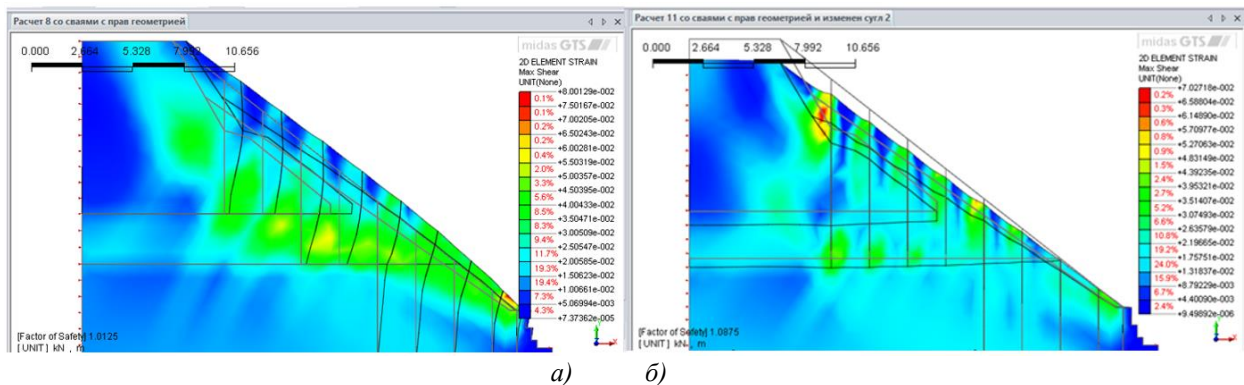


Рисунок 5. Схема перемещений откоса со сваями с показом деформированного состояния (неактуальные деформации, то есть с показом не в масштабе) и потенциальной плоскостью сдвига: а) – короткие сваи; б) – удлиненные сваи.

Коэффициент запаса устойчивости для случая на рисунке 5а -  $K_{зап.} = 1.0125$ , что говорит о недостаточной устойчивости конструкции в данном варианте также. Для расчётного случая для

потенциальной плоскости сдвига на рисунке 5б -  $K_{зап.} = 1.0875$ , что говорит о возросшей устойчивости конструкции в данном варианте обустройства откоса.



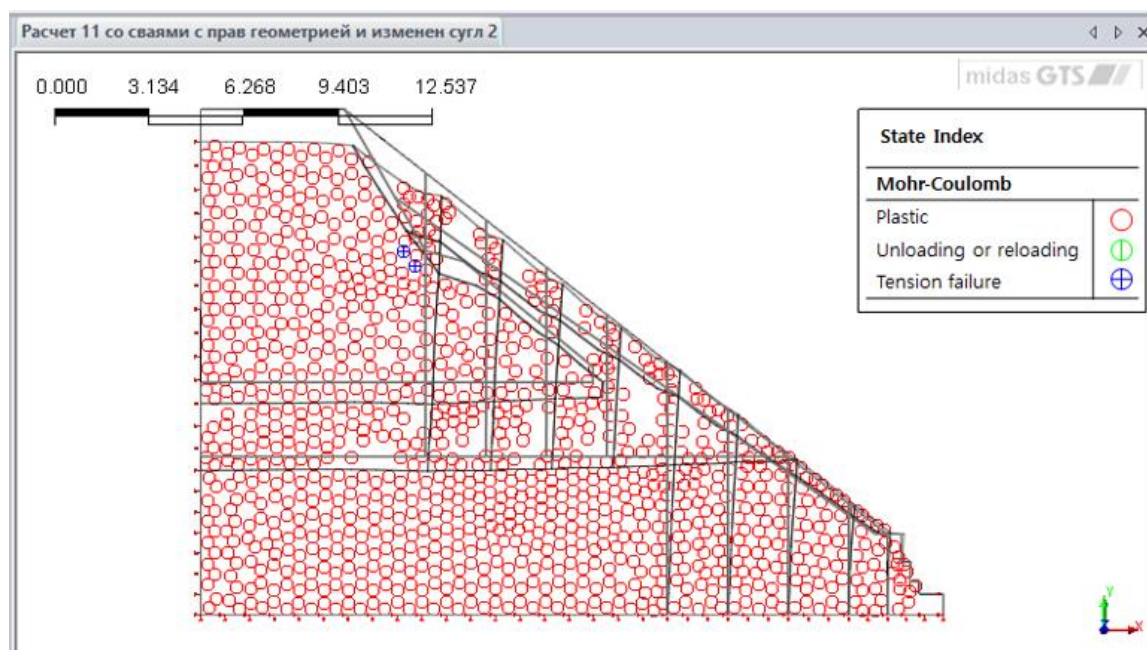


Рисунок 6. Развитие зон пластических деформаций грунта откоса.

На рисунке 6 представлено развитие зон пластических деформаций грунта откос и видно, что сваи заставляют откос работать практически как единое целое.

Разница в коэффициенте безопасности между методом конечных элементов (FEM) и результатами метода предельного равновесия (LEM) невелика. Метод предельного равновесия LEM был основным методом оценки устойчивости склонов на протяжении десятилетий.

Однако из-за некоторых недостатков LEM FEM является отличным инструментом для моделирования нелинейного поведения напряженно-деформированного состояния материалов и понимания стабильности на основе деформаций. В подходе FEM заранее не нужно делать никаких предположений о форме или расположении поверхности разрушения.

Для обеспечения длительной устойчивости откосов и склонов применяются различные методы - от «замещения» слабого грунта или искусственного улучшения строительных свойств грунта до устройства различных преграждающих конструкций. Одним из наиболее эффективных методов может быть устройство вертикальных армирующих конструкций из свай или шпунтовых стенок. Выбор инженерного решения обеспечения длительной устойчивости и безопасной эксплуатации грунтового сооружения должен осуществляться в каждом конкретном случае на основе расчётов и анализе НДС грунтового массива.

Эти инструменты позволяют визуализировать и анализировать взаимодействие различных сил, например, гравитационных сил, сопротивления сдвигу грунта и других факторов, которые могут влиять на стабильность склона. Такие графические представления могут быть особенно полезными для определения слабых зон или областей, требующих дополнительных мер по укреплению.

В целом, использование современного программного обеспечения и инструментов для анализа предельного равновесия помогает инженерам лучше понимать и решать сложные проблемы, связанные с устойчивостью склонов. Факторы, влияющие на нестабильность склона, включают геологию, топографию местности, типы грунтов, свойства грунтов, местный климат (осадки и испарение) и структуру потока воды внутри склона. Как правило, влияние осадков на разрушение склонов объясняется потерей всасывания влаги по мере продвижения фронта увлажнения от поверхности земли или подъёмом уровня грунтовых вод внутри склона. Также возможно, что оба процесса происходят одновременно.

Необходимо также учесть современные остро стоящие вопросы: необходима ранняя подготовка к адаптации к последствиям изменения климата – например использовать возможности роста растительности, которая играет важную роль в стабилизации мелководного разрушения склона и значительно влияет на стабильность откоса.

Для управления рисками устойчивости склонов необходимы программы общественных коммуникаций и создание эффективной системы управления инцидентами для повышения безопасности склонов и их защиты независимо от последствий изменения климата. Склоны и защитные сооружения склонов должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать самые тяжёлые условия грунтовых вод. Кроме того, необходимы повышенные требования к квалификации инженеров (Geotechnical) для регистрации в качестве членов профессиональных сообществ. Необходима и актуальная нормативная база.

Жизненный цикл сооружения защиты склонов начинается с концептуального плана, адекватного проектирования и качественного строительства. Он

сопровождается обязательной регулярной проверкой и надлежащим обслуживанием.

Угрозы для окружающей среды из-за неудач склонов могут создать риск, который влияет на экологическую устойчивость. Стоимость ремонта откосов дороже стоимости профилактических мероприятий. Поэтому инженеры должны хорошо понимать механизм, приводящий к авариям склонов, вызванным осадками, что позволяет предпринять соответствующие действия для предотвращения аварий склонов.

#### **Использованная литература**

6. Keller Solutions Matrix-2020 – 3р.  
<https://www.keller-na.com/sites/keller-na/files/2020-09/keller-solutions-matrix-2020.pdf>
2. Буфеев, Ф.К., Фоменко, И.К. Оценка зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от применяемой модели распределения свойств грунтов и метода расчёта. Сборник трудов конференции Восемнадцатая ежегодная конференция «Сергеевские чтения» памяти академика Е.М. Сергеева "Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи". Юбилейная конференция, посвящённая 25-летию образования ИГЭ РАН. Москва, 24–25 марта 2016 года. Издательство: Российский университет дружбы народов (РУДН, Москва) - С. 584-588  
[https://elibrary.ru/download/elibrary\\_25885461\\_51126992.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_25885461_51126992.pdf)
3. Tarun Goel, Vinod K. Sonthwal. A Review on Slope Stability Analysis by Strength Reduction Method using MIDAS GTS. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 6, Issue 8, August 2017. P. 1050-1053.
4. Федоровский, В.Г., Курилло, С.В., Скороходов, А.Г. Об оценке оползневой опасности на береговом склоне р. Москвы в районе Карамышевского проезда и расчётное обоснование проекта противооползневых мероприятий. – Вестник НИЦ «Строительство» «Геотехника и подземное строительство» №4(23) 2019г. / под ред. А.И. Звезда – М.: АО «НИЦ Строительство». 2019г. – 152 стр. С. 121-136
5. Федоренко, Е.В. Метод расчёта устойчивости путём снижения прочностных характеристик. Транспорт Российской Федерации №6(49) 2014г. - С. 24-28
6. Перевощикова, Н. А., Идиятуллин, М. М. Сравнительный анализ устойчивости потенциально оползнеопасных склонов по результатам расчетов аналитическими методами и методом конечных элементов / Н. А. Перевощикова, М. М. Идиятуллин // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 6 (48) Часть 5. — С. 144—149. — URL: <https://research-journal.org/earth/sravnitelnyj-analiz-ustojchivosti-potencialno-opolzneopasnyx-sklonov-po-rezultatam-raschetov-analiticheskimi-metodami-i-metodom-konechnyx-elementov/> (дата обращения: 29.05.2022). DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.126
7. Богомолов, А.Н. Обоснование обеспечения длительной устойчивости откосов при помощи различных инженерных мероприятий / А.Н. Богомолов, А.В. Соловьёв, С.И. Шиян, О.А. Богомоллова, В.Н. Кужель, Я.В. Качурин, И.В. Якименко // Материалы V Международной конференции Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов. – Часть III. – 2011. - С. 23-29.
8. Богомолов, А. Н., Шиян, С. И., Соловьёв, А. В., Богомоллова О. А. / Регулирование напряженного состояния и устойчивости земляных сооружений. Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 3(34). 11 стр. [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru)
9. Горшков, Н. И. Разработка и внедрение геомеханического обеспечения проектирования транспортных сооружений на основе метода конечных элементов: автореф. диссертации доктора технических наук: 05.23.11 / Н. И. Горшков. - Хабаровск: [б. и.], 2016. - 40 с.: ил.

УДК 627/628

**БЕЗ МАЛЫХ РЕК НЕТ РЕК БОЛЬШИХ**

**Зборовская Марина Ильинична,**  
доцент кафедры гидротехнических сооружений  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, кандидат технических наук;  
Россия, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49.

**Фартуков Василий Александрович**  
доцент кафедры гидротехнических сооружений  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, кандидат технических наук;  
Россия, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49.

**WITHOUT SMALL RIVERS, THERE ARE NO BIG RIVERS**

**Zborovskaya Marina Ilyinichna**  
Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures of  
the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
candidate of technical sciences;  
Russia, 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49.

**Fartukov Vasily Alexandrovich**  
Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures of  
the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
candidate of technical sciences;  
Russia, 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49.

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.114.1.1913

**АННОТАЦИЯ**

Малые реки играют важную роль в экосистеме и жизни людей. Уход за реками, особенно в пределах антропогенно заданных территорий, является необходимостью. Речные экологические проблемы сегодня переросли отраслевые рамки. Изменение гидрологического режима, загрязнение воды, потеря береговых зон, распространение инвазивных видов. Сотрудничество всех заинтересованных сторон, включая правительства, научные организации, общественные организации и общество в целом, является ключевым фактором в борьбе с речными экологическими проблемами. Состояние малых рек в настоящее время вызывает серьезные опасения, а они играют важную роль в формировании средних и больших рек. Безусловно, малые реки влияют на качество воды в реке Волге и её состоянии. Решить же проблему можно только системно. И состояние реки – отражение состояния всех аспектов жизни прилегающих регионов.

**ANNOTATION**

Small rivers play an important role in the ecosystem and people's lives. Maintaining rivers, especially within anthropogenically affected areas, is a necessity. River environmental problems today have outgrown industry boundaries. Changes in hydrological regime, water pollution, loss of coastal zones, spread of invasive species. The cooperation of all stakeholders, including governments, scientific organizations, civil society organizations and society, is a key factor in combating river environmental problems. The state of small rivers is currently causing serious concern, and they play an important role in the formation of medium and large rivers. Of course, small rivers affect the quality of water in the Volga River and its condition. The problem can only be solved systematically. In addition, the state of the river is a reflection of the state of all aspects of life in the surrounding regions.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, малая река, самовосстановление рек, качество воды, природоприближенное восстановление рек

**Key words:** hydraulic structures, small river, self-restoration of rivers, water quality, nature-based restoration of rivers

Малые реки играют важную роль в экосистеме и жизни людей:

1. Питание и орошение: малые реки обеспечивают воду для питья и орошения сельскохозяйственных угодий. Они являются источником пресной воды для животных и растений, что существенно влияет на сельскохозяйственное производство.

2. Биологическое разнообразие: малые реки являются уникальными экосистемами, которые обеспечивают место обитания для множества видов растений и животных. Они служат убежищем для

многих водных организмов, включая рыб, лягушек, раков и водных насекомых.

3. Регулирование климата: малые реки выполняют роль водоудержания, что помогает управлять водным балансом в регионе. Они способствуют увлажнению почвы и снижению эрозии, а также улучшают качество воздуха и климатические условия в окружающей среде.

4. Рекреационные возможности: малые реки предлагают людям возможность проводить время на природе и заниматься различными видами активного отдыха, такими как рыбалка, катание на

лодках, плавание и прогулки вдоль реки. Они также привлекают туристов, которые приезжают насладиться красотой и спокойствием.

5. Экономическое значение: малые реки играют важную роль в развитии местных экономик. Они могут использоваться для различных целей, таких как гидроэнергетика, сельскохозяйственное производство, рыболовство и туризм. Это способствует созданию рабочих мест и увеличению доходов в регионе.

В целом, малые реки являются ценными ресурсами, которые необходимо бережно сохранять и защищать. Они предоставляют множество преимуществ для окружающей среды и жизни людей, их сохранение и устойчивое использование являются важными задачами для обеспечения благополучия нашей планеты.

Уход за реками, особенно в пределах антропогенно задействованных территорий, является необходимостью. Вот несколько причин, почему это важно:

1. Защита водных ресурсов: уход за реками помогает сохранить качество и чистоту воды. Это важно для обеспечения доступа к пресной воде для питья, сельского хозяйства и промышленности. Регулярная очистка и мониторинг качества воды помогают предотвратить загрязнение и сохранить её пригодность для использования.

2. Управление стоками воды: реки играют важную роль в регулировании стоков воды. Уход за реками включает в себя строительство и обслуживание водохранилищ, плотин и систем дренажа, которые помогают предотвратить наводнения и суховей.

3. Восстановление речных экосистем: антропогенная деятельность может сильно повлиять на речные экосистемы, включая прекращение или изменение естественного течения рек, разрушение береговых ландшафтов и потерю биологического разнообразия. Уход за реками включает в себя реставрацию береговых зон, создание местообитаний для рыб и других водных организмов, а также регулярное очищение от мусора и отходов.

4. Социальное и экономическое значение: реки являются не только важными экологическими системами, но и имеют значительное социальное и экономическое значение. Они предоставляют людям места для отдыха, рыбалки, водных видов спорта и рекреации. Уход за реками помогает сохранить эти возможности и создает благоприятную среду для развития туризма и других секторов экономики, связанных с рекой.

Забота о реках на антропогенно задействованных территориях включает в себя не только регулярное уборку и очистку, но и принятие мер по снижению загрязнения и устранению источников загрязнения. Это требует сотрудничества и участия как государственных, так и общественных организаций, а также самодисциплины и ответственности от каждого человека [1].

Речные экологические проблемы сегодня переросли отраслевые рамки. Вмешательство человека в речные системы, такие как строительство плотин, каналов, дамб, а также неправильное использование и загрязнение водных ресурсов, привели к серьезным последствиям для речных экосистем и окружающей среды. Вот некоторые из этих проблем:

1. Изменение гидрологического режима: строительство плотин, каналов и дамб приводит к изменению естественного течения рек. Это может привести к снижению уровня воды или, наоборот, к наводнениям, а также к изменению режима сезонных потоков и стоков воды. Это влияет на животный и растительный мир, приводя к потере местообитаний и снижению биологического разнообразия.

2. Загрязнение воды: реки подвержены загрязнению из различных источников, включая промышленные стоки, сельскохозяйственные удобрения и пестициды, городскую канализацию и неуправляемую промышленную деятельность.

3. Потеря береговых зон: береговые зоны рек являются важными экосистемами, которые поддерживают биологическое разнообразие и предоставляют местообитания для множества видов растений и животных. Неправильное использование и застройка береговых зон приводят к потере их экологической ценности и ухудшению качества воды.

4. Распространение инвазивных видов: интенсивная деятельность человека в речных системах способствует распространению инвазивных видов растений и животных. Эти виды могут вытеснять местные виды, нарушая баланс экосистемы и приводя к сокращению биологического разнообразия.

Для решения этих проблем необходимо принимать комплексные меры, включая улучшение управления водными ресурсами, внедрение экологически устойчивых практик в промышленности и сельском хозяйстве, защиту и восстановление береговых зон, а также повышение осведомленности и ответственности людей в отношении речных экосистем. Сотрудничество всех заинтересованных сторон, включая правительства, научные организации, общественные организации и общество в целом, является ключевым фактором в борьбе с речными экологическими проблемами.

С этой точки зрения наиболее важны пределы технических возможностей управления процессами самоочищения речных вод [1]. Потеря экологической устойчивости реками является и грозным предупреждением, и очагом распада вмещающих их ландшафтных таксонов.

Гидрографическая сеть малых и больших водотоков рассекает равнинные территории страны. При этом средние расстояния между водотоками меняются от 2 до 3 км, то есть обратная величина – густота речной сети составляет 0,3 – 0,5 км/кв. км. Основную долю в суммарной протяженности рек составляют малые реки. Они

весьма уязвимы к влияниям загрязнений, земледелия, регулирования и потребления стока. От способности малых рек к самоочищению и к поддержанию гидрологического режима зависят экологические условия средних и крупных рек [1].

При этом водные объекты, такие как реки, озера и водохранилища, можно рассматривать как часть более широкой системы - водосборного бассейна.

Понимание взаимосвязи между водными объектами и водосборным бассейном является важным для правильного управления водными ресурсами. Необходимо принимать меры по охране и восстановлению водосборных территорий, чтобы обеспечить устойчивое функционирование водных объектов и сохранение их экологической ценности. Координация и сотрудничество между заинтересованными сторонами на уровне водосборного бассейна (в том числе малого) являются важными для достижения устойчивого управления водными ресурсами.

Естественные природные системы имеют сбалансированную систему показателей водного баланса в отличие от искусственной водной системы, созданной при участии человека. Нарушая пути движения естественных поверхностных и грунтовых вод на водосборе, человек создаёт систему водоснабжения и водоотведения для сточных вод (СВ) и поверхностных вод для обеспечения подачи воды и отвода использованных водных ресурсов [2].

Состояние малых рек в настоящее время вызывает серьезные опасения. Антропогенная нагрузка, включающая загрязнение сточными водами, промышленными выбросами и использование пестицидов и удобрений в сельском хозяйстве, значительно снижает качество воды в этих реках. Это может привести к ухудшению условий для жизни водных организмов и снижению биоразнообразия.

Кроме того, малые реки играют важную роль в формировании средних и больших реки и в сохранении экологической целостности водных систем.

Для решения этих проблем необходимо принимать комплексные меры. Важно улучшить системы очистки сточных вод и предотвратить загрязнение рек химическими веществами. Охрана и восстановление растительности в речных бассейнах может помочь улучшить качество воды и поддержать биоразнообразие.

Более широкое осознание и ответственность со стороны общества также являются неотъемлемыми компонентами для сохранения и восстановления малых рек. Это может включать образовательные программы, повышение осведомленности об экологических проблемах рек и принятие индивидуальных действий для сохранения водных ресурсов.

Проблема всеобщая и существует много и зарубежной литературы на данную тему: например, в статье «The Importance of Small Rivers: Connectivity and Threats» («Важность малых рек:

связность и угрозы») (M. Tockner и J.V. Ward) рассматривается важность малых рек в экосистемах и их связь с более крупными реками. Статья также обсуждает угрозы, с которыми сталкиваются малые реки и вопросы о том, как их можно защитить.

Связность относится к экологическим связям между различными местообитаниями и экосистемами внутри речной сети. Малые реки играют решающую роль в поддержании этой связности, поскольку они соединяют верховья с более крупными реками и, в конечном итоге, с морем. Они служат коридорами для перемещения водных видов, обеспечивая миграцию, расселение и генетический обмен.

Одним из ключевых моментов, подчеркнутых в статье, является то, что малые реки часто игнорируются в усилиях по сохранению по сравнению с более крупными реками. Однако они вносят значительный вклад в сохранение биоразнообразия и функционирование экосистем. Малые реки поддерживают разнообразие видов, включая рыб, беспозвоночных и растений, многие из которых приспособлены к конкретным местообитаниям внутри этих рек. Сохраняя малые реки, мы обеспечиваем сохранение этих уникальных и специализированных видов.

В статье также обсуждаются угрозы, с которыми сталкиваются малые реки. Одной из основных угроз является фрагментация местообитателей, которая происходит, когда человеческая деятельность, такая как строительство плотин, изменение использования земли и урбанизация, нарушает естественный поток воды и фрагментирует речные сети. Эта фрагментация препятствует движению видов, нарушает их жизненные циклы и снижает генетическое разнообразие.

Авторы также подчеркивают важность учета накопительного воздействия нескольких факторов на малые реки. Климатические изменения, например, могут усугубить существующие угрозы, изменяя гидрологические паттерны, повышая температуру воды и усиливая экстремальные явления, такие как наводнения и засухи.

В статье «Assessment of Water Quality in Small Rivers: Challenges and Approaches» («Оценка качества воды в малых реках: проблемы и подход») (R. Chhetri et al.) рассматриваются вызовы, связанные с оценкой качества воды в малых реках, и предлагаются подходы и методы для решения этих проблем, а также вызовы, с которыми сталкиваются при проведении таких оценок, и подходы, используемые для их решения.

Один из основных вызовов - это ограниченность данных. В отличие от больших рек и озер, в малых реках обычно отсутствуют непрерывные мониторинговые данные, и информация о качестве воды может быть ограничена во времени и месте.

Еще одним вызовом является разнообразие источников загрязнения. Малые реки часто подвержены влиянию различных источников загрязнения, таких как сельское хозяйство,

промышленность, стоки от домашних хозяйств и сточные воды. Оценка и мониторинг качества воды в таких условиях требует комплексного подхода и учета всех возможных источников загрязнения.

Статья также описывает различные подходы, используемые для оценки качества воды в малых реках. Это включает использование физико-химических параметров, таких как содержание кислорода, pH, температура, а также биологических показателей, таких как наличие индикаторных видов и биомассы. Также в статье обсуждаются методы мониторинга, включая местные и дистанционные наблюдения, использование автоматизированных систем и моделирование.

Необходимы разработки эффективных подходов для решения вызовов. Это позволит более полно понять состояние и требования малых рек, а также принять меры по их защите и управлению водными ресурсами.

В статье «Restoring Small Rivers for Ecosystem Services: A Review of Ecological Approaches and Implementation Challenges» («Восстановление малых рек для экосистемных услуг: обзор экологических подходов и проблем реализации») (J. Miller et al.) обсуждаются методы восстановления экосистемных услуг в малых реках и проблемы, с которыми сталкиваются при их реализации.

Малые реки играют важную роль в предоставлении экосистемных услуг, таких как регуляция водного режима, водоснабжение, поддержание биоразнообразия и сельскохозяйственное производство. Однако в результате различных антропогенных воздействий, таких как дамбы, загрязнение и изменение водных режимов, многие малые реки пострадали и лишились своих экосистемных функций.

Статья обзорно рассматривает различные экологические подходы к восстановлению малых рек. Один из подходов - это восстановление естественных гидрологических режимов, включая восстановление структуры русла реки, естественного режима потока воды и обеспечение доступа для рыб и других водных организмов к различным местообитаниям. Это может включать удаление преград, восстановление природных участков русла и восстановление природных процессов, таких как затопления и переувлажнение.

Другим подходом является восстановление биологического разнообразия в малых реках. Это может включать восстановление рыбных популяций, восстановление растительности, восстановление природных условий для размножения и выживания водных организмов и создание биоразнообразных местообитаний в реке.

Однако статья также выделяет ряд проблем, связанных с реализацией экологических подходов к восстановлению малых рек. Некоторые из этих проблем включают ограниченные финансовые и человеческие ресурсы, отсутствие согласования между заинтересованными сторонами, сложность

определения целей восстановления и оценки его эффективности. Требуется учет проблем и вызовов, связанных с их реализацией, и сотрудничество между заинтересованными сторонами.

В статье «The Role of Small Rivers in Watershed Management: A Review» («Роль малых рек в управлении водосборами: обзор») (S. Shrestha et al.) раскрывается роль малых рек в управлении водными бассейнами и их важность для устойчивого управления водными ресурсами, а в статье «Small Streams, Big Impacts: The Importance of Small Streams in Watershed Ecology» («Маленькие реки, большие последствия: важность малых рек в экологии водоразделов») (D. Allan et al.) подчеркивается важность малых рек в экологии водных бассейнов и то, как они влияют на качество воды и биоразнообразие.

Очевидно - малые реки играют важную роль в поддержании устойчивого состояния реки Волги. Водосборные бассейны малых рек влияют на сток воды, попадающей в реку Волгу. Когда малые реки испытывают дефицит воды или их сток существенно снижается, это может привести к обмелению Волги. Так, например, согласно [3] существующие очистные сооружения на многих предприятиях г. Волгограда по своим технологическим параметрам не могут обеспечить очистку стоков в соответствии с действующими нормативами. Необходим комплекс мероприятий природоохранного характера с оптимизацией их с точки зрения экономики использования речной системы региона в целом.

Кроме того, малые реки также могут влиять на качество воды в Волге. Если малые реки загрязнены химическими веществами или сточными водами, это может привести к загрязнению и снижению качества воды в реке Волге и её водохранилищах.

Следовательно, поддержание достаточного стока воды в малых реках и предотвращение загрязнения важно для устойчивого состояния реки Волги. Это может включать меры по сохранению и восстановлению растительности в речных бассейнах, улучшению систем очистки сточных вод и контролю использования химических веществ в сельском хозяйстве и промышленности. Также важно сотрудничество и координация между заинтересованными сторонами на уровне водосборного бассейна для достижения устойчивого управления водными ресурсами и предотвращения обмеления Волги (рис.1).

Для поддержания состояния реки Волги необходимо рассматривать различные экологические подходы к восстановлению малых рек, такие как восстановление растительности в прибрежной зоне, создание и восстановление природных водоемов, восстановление миграционных путей для рыб и организация регулярного мониторинга состояния рек.

Одной из основных проблем является возможное отсутствие финансирования и ограниченные ресурсы для восстановительных мероприятий, а реализация подобных проектов



требует согласования интересов различных заинтересованных сторон, таких как местные

сообщества, промышленные предприятия и правительственные органы.

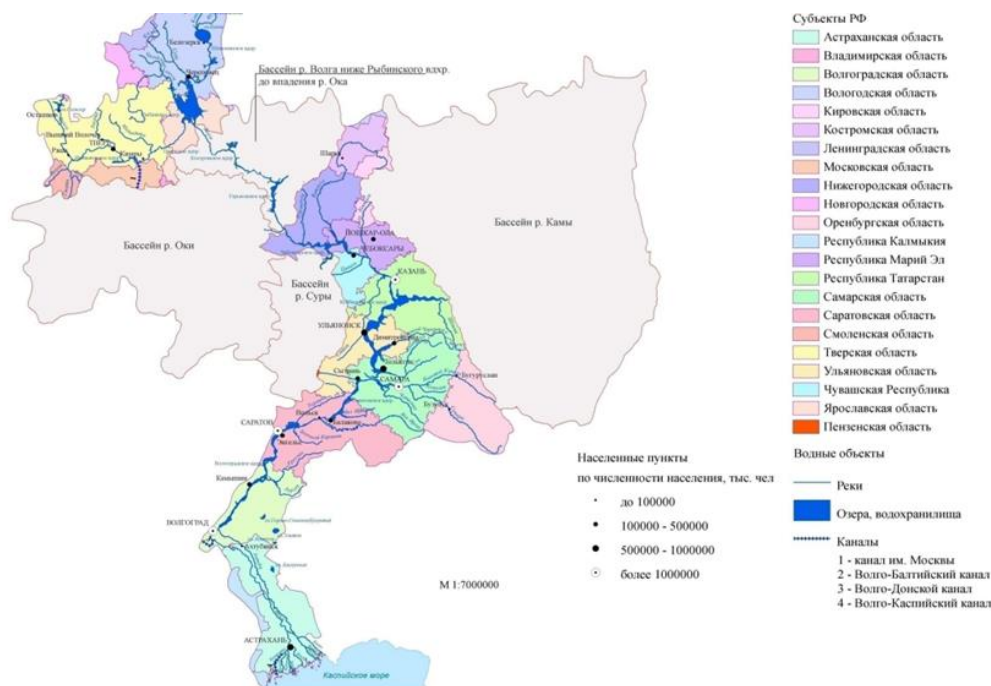


Рис. 1. Карта-схема объектов, индивидуально учитываемых в СКИОВО реки Волги [4].

Отметим важность разработки стратегий и планов восстановления, учета местных особенностей и обеспечения участия всех заинтересованных сторон. Кроме того, успешная реализация восстановительных мероприятий в малых реках требует долгосрочных усилий и постоянного мониторинга для оценки и адаптации проводимых мер.

Существуют различные подходы к восстановлению экосистемных услуг в малых реках и решению проблем, с которыми сталкиваются при их реализации. Это может быть полезной информацией для разработки и реализации программ восстановления в малых реках.

Согласно статье Тамары Михайловой, в Российской газете от 25.06.2023г. «Экологи назвали причину обмеления Волги» (<https://rg.ru/2023/06/25/reg-pfo/ekologi-nazvali-prichinu-obmeleniia-volgi.html?ysclid=lpqoco9ct133212541>): «Волга выдерживает сильнейшую антропогенную нагрузку, и существует целый ряд негативных факторов, вызванных жизнедеятельностью человека. Это и зарегулированность естественного течения, и чрезмерный разбор воды для нужд питьевого водоснабжения городов, и сброс сточных вод, и неграмотное полеводство, и неправильная добыча песка и гравия. Все перечисленные проблемы касаются и других рек нашей страны.

Например, в Московской области насчитывается 4312 рек, некоторые постепенно пересыхают. В Серпуховском районе сильно сузились русла рек Речма и Сушка, впадающих в Оку. На севере региона, в Дмитровском районе сильно заросло русло реки Яхромы и её притоков

Волгуша и Икша. Те же проблемы наблюдаются в бассейнах рек Урала. Требуют расчистки и малые реки Пермского края. А ... в станции Вешенской, где раньше ходили корабли, сейчас даже моторные лодки не проходят. Острова появляются, которых раньше не было.

Основной причиной называют климат, глобальное потепление. Не менее важна и деятельность человека, которая в наши времена соизмерима с деятельностью природных факторов.

Обмеление Волги грозит резким снижением численности промысловых и иных пород рыбы. В период маловодья погибает до 80% икры, утверждает эксперт Института экологии НИУ ВШЭ Ирина Тельнова [5].

Согласно статье в газете Новые Известия от 12.08.2023 года по данным Минприроды, ежегодно в водные объекты Волжского бассейна сбрасывается более 6 куб. км сточных вод, из которых 90% — без очистки или недостаточно очищенные. Крупные притоки Волги — Ока и Кама — также официально оцениваются как чрезвычайно грязные. В критическом состоянии и малые реки бассейна Волги. Только в Нижнем Новгороде их 12. Самой грязной и токсичной признана Ржавка. По мнению экологического движения «Поможем реке», водоемы города уже попросту «неживые», там стоячая цветущая вода [6].

Но самое страшное — это сток в Волгу промышленных, сельскохозяйственных предприятий и структур ЖКХ. У Волги практически отсутствуют зоны санитарной охраны. И это делает её воду практически неприемлемой для питья. Всё это создает угрозу здоровью и жизни людей. К примеру, у жителей Чкаловского района

Нижегородской области уже пять лет из кранов течет грязная вода, а в Кстове (Нижегородская область) в начале этого года из-за плохой воды едва не вспыхнула кишечная инфекция.

Основное загрязнение Волги — промышленные сбросы, канализационные и сельскохозяйственные стоки. Самые большие объемы загрязненных вод приходятся на Москву (через притоки), Самару, Нижний Новгород, Ярославль, Саратов, Уфу (притоки) и Волгоград.

Решить же проблему можно только системно. И состояние реки — отражение состояния всех аспектов жизни прилегающих регионов.

«Для начала необходима реальная инвентаризация промышленных предприятий, которые производят стоки в Волгу, свалок, расположенных по берегам. Затем надо начать очистку малых рек, которые впадают в Волгу, будучи загрязненными, проверить наличие очистных сооружений. Сегодня в верховьях Волги — по сути настоящая свалка. Начинать работу надо оттуда, проверив, насколько сброс соответствует регламенту. Необходимо категорически прекратить засыпку и застройку берегов пойм малых, средних и крупных притоков, и собственно, реки Волги», — считает генеральный директор АО «Геолэкспертиза» Сергей Якуцени [6].

Так или иначе мы вновь возвращаемся к проблеме, активно звучавшей в 1990-ые годы — проблеме очистки и восстановления малых рек. В Москве в 1994 году была принята одноименная программа. Но последние годы этот вопрос звучит намного реже, а проявляется еще более серьезными экологическими проблемами. Ведь без малых рек — нет рек больших.

Экологические проблемы находятся на стыке многих наук и многих проблем и решать их надо системно, комплексно и безотлагательно, и примеры осуществлённых решений известны [7-16].

#### Список литературы:

1. Енгибарян, У.В., Натальчук, Ю.М., Погодаев, А.Е., Прохоров, И.П. Оздоровление речных ландшафтов: принципы и технологии / Сборник «Принципы рационального водообеспечения агропромышленного комплекса: Российская Академия сельскохозяйственных наук, Москва, 1997г. — стр. 57-70.
2. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов: Москва: Бюро НТД, 2019. — 446с.
3. Матвеева, А.А., Кочарян, Н. К. Специфика организации государственного водного мониторинга (на примере реки волги в границах волгоградской области) // Природные системы и ресурсы. 2022. №4. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-organizatsii-gosudarstvennogo-vodnogo-monitoringa-](https://cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-organizatsii-gosudarstvennogo-vodnogo-monitoringa)

[na-primere-reki-volgi-v-granitsah-volgogradskoy-oblasti](#)

(дата обращения: 04.12.2023).

4. Схема комплексного использования и охраны Водных объектов бассейна реки Волга. Книга 1. Общая характеристика речного бассейна. Утверждена приказом Нижне-Волжского Бассейнового Водного управления от «14» августа 2015 г. № 233. — 105 с. <https://cloud.mail.ru/public/4aeP/HRHTJCqda>

5. Экологи рассказали о способах решения проблемы обмеления Волги. Сюжет. Известия от 17.11.2023года. <https://iz.ru/1606686/2023-11-17/ekologi-rasskazali-o-sposobakh-resheniia-problemy-obmeleniia-volgi>

6. Мишина Ирина. Мутная история: почему программы очистки Волги делают реку все более грязной // Новые Известия 12 августа 2023. <https://newizv.ru/news/2023-08-12/mutnaya-istoriya-pochemu-programmy-ochistki-volgi-delayut-reku-vse-bole-gryaznoy-416241?ysclid=lpqow4p8rv952120491>

7. Румянцев, И.С., Чалов, Р.С., Кроммер, Р.К., Нестман, Ф. Природоприближенное восстановление и охрана водных объектов. // Под ред. Румянцева И.С. Москва, МГУ Природообустройства, 2001г. - 287 с.

8. Зборовская, М.И., Зимнюков, В.А., Козимиров, Н.Ю. Значение водных объектов в формировании экологического каркаса урбанизированной территории. В сборнике: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. Сер. "ECOLOGICAL STUDIES, HAZARDS, SOLUTIONS" Отв. редакторы: С.В. Котелевцев, С.Н. Орлов, О.М. Горшкова, С.А. Остроумов. Москва, 2015. С. 20-23.

9. Кондратьев, Л.И., Зборовская, М.И., Зимнюков, В.А., Кавжарадзе, Г.В. о безопасности гидротехнических сооружений Рублевского гидроузла (Рублёвской станции водоподготовки - РВС) Природообустройство. 2010. № 3. С. 29-38.

10. Применение искусственного интеллекта при оптимизации орошения и применении гербицидов. Федосов А.Ю., Меньших А.М., Фартуков В.А., Зборовская М.И., Васильев Д.М. Экономика строительства. 2023. № 2. С. 42-51.

11. Оценка воздействия комплексов гидротехнических сооружений на формирование ландшафтов водоохраных зон Москворецкой и Волжской водохозяйственных систем / М. А. Хрусталева, С. В. Суслов, М. И. Зборовская, В. А. Зимнюков // Природообустройство. — 2019. — № 1. — С. 27-34.

12. Система управления водными объектами города Москвы, их технической и экологической безопасностью. Зимнюков В.А., Зборовская М.И. В сборнике: Доклады ТСХА. Материалы Международной научной конференции. 2017. С. 7-9.

13. Экологическая и техносферная безопасность: новые направления в разработке научных основ. Учебно-методическая разработка.



Остроумов С.А., Зимнюков В.А., Зборовская М.И. В сборнике: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. Сер. "ECOLOGICAL STUDIES, HAZARDS, SOLUTIONS" Отв. редакторы: С.В. Котелевцев, С.Н. Орлов, О.М. Горшкова, С.А. Остроумов. Москва, 2015. С. 179-183.

14. Принципы управления орошением овощных культур. Фартуков В.А., Зборовская М.И., Федосов А.Ю., Меньших А.М., Васильев Д.М.

Инновации и инвестиции. 2022. № 11. С. 262-268.

15. Квалификация инженера-строителя и гидротехника как творческая профессия / М. И. Зборовская, В. А. Фартуков, С. И. Дубинский, Д. А.

Алексеев // Устойчивое развитие России - 2022: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Петрозаводск, 26 сентября 2022 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. – С. 57-65.

16. Зборовская, М. И. Подход к территориальному планированию и инженерному проектированию с интеграцией городского водного цикла / М. И. Зборовская, В. А. Зимнюков // Доклады ТСХА: Сборник статей. Выпуск 293, Москва, 02–04 декабря 2020 года. Том Часть I. – Москва: РГАУ, 2021. – С. 54-57.

УДК 627/628

---

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КАК ПРИРОДОПРИБЛИЖЕННЫЕ СИСТЕМЫ

---

**Зборовская Марина Ильинична,**

*доцент кафедры гидротехнических сооружений  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, кандидат технических наук;  
Россия, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49.*

**Фартуков Василий Александрович**

*доцент кафедры гидротехнических сооружений  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, кандидат технических наук;  
Россия, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49.*

**Мелехин Никита Павлович**

*магистрант ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева;  
Россия, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49.*

## HYDRAULIC SYSTEMS AS NATURE-BASED SYSTEMS

**Zborovskaya Marina Ilyinichna**

*Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures of  
the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
candidate of technical sciences;  
Russia, 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49.*

**Fartukov Vasily Alexandrovich**

*Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures of  
the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
candidate of technical sciences;  
Russia, 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49.*

**Melekhin Nikita Pavlovich**

*Master's student of the Russian State Agrarian University -  
Moscow Timiryazev Agricultural Academy;  
Russia, 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49.*

[DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.114.1.1914](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.114.1.1914)

### АННОТАЦИЯ

Любая гидротехническая система – система «деятельная», что выражает идеологию строительства гидросистем и последующее влияние данной идеологии на проектирование, строительство и эксплуатацию, то есть саму деятельность гидротехнических систем. Но в самой идеологии часто нет должного внимания такому объекту воздействия гидротехнической системы как природные условия региона. Необходимо определить все природные факторы и воздействия, на которые гидротехническая система влияет своей деятельностью и обеспечить предотвращение негативного воздействия гидромелиоративных систем и других «деятельных» объектов на окружающую среду априори, без необходимости бороться с уже возникшими негативными последствиями.

### ANNOTATION

Any hydraulic system - an “active” system - expresses the ideology of construction of hydraulic systems and the subsequent influence of this ideology on the design, construction and operation, that is, the very activity of hydraulic systems. The ideology itself often does not give due attention to such an object of influence of the hydraulic system as the natural conditions of the region. That is, when designing, it is necessary to determine all

the natural factors and influences that the hydraulic system influences through its activities and to ensure that the negative impact of irrigation systems and other “active” objects on the environment is a priori prevented, without the need to deal with negative consequences that have already arisen.

**Ключевые слова:** гидротехническая система, идеология строительства гидросистем, негативные последствия, природные условия региона.

**Keywords:** hydraulic system, ideology of construction of hydraulic systems, negative consequences, natural conditions of the region.

Любая гидротехническая система – система «деятельная». Предметом, с помощью которого человек организует свою деятельность, является вода, а точнее то количество воды, которое человек сохраняет, отводит, транспортирует или выливает на единицу площади. А вот объектов воздействия в гидротехнической системе – два: *во-первых*, это то, ради чего человек создает гидросистему – ложе и берега водоёма, система распределение и потребления отведенной воды, система транспортировки воды или сельскохозяйственные культуры, ради которых человек строит оросительную систему; *во-вторых*: совокупность природных факторов, на которые, опосредовано, воздействует человек (например, почвы, грунтовые воды, водоисточник и водоприёмник, животный и растительный мир и т.д.).

Рассмотрим взаимосвязь между сформулированной (или нет) идеологией строительства гидросистем и последующим влиянием данной идеологии на проектирование, строительство и эксплуатацию, то есть саму деятельность гидротехнических систем. Под **идеологией** будем понимать инструмент, определяющий цели и задачи при строительстве гидротехнической системы [1-6].

Чаще всего цели и задачи строительства гидросистем формулируются как повышающие благосостояние через рост производства и потребления электроэнергии, водопотребление, водотранспортный оборот, повышение урожайности сельхозкультур, что, согласно официальной политике, преследует, как правило, благородную цель – улучшить жизнь народонаселения, но, к сожалению, и благородная цель может повлечь *негативные последствия*. И, прежде всего негативные последствия возникают потому, что в самой идеологии нет должного внимания второму объекту воздействия гидротехнической системы – природным условиям региона. Последовательность этого легко проанализировать на принципах и последовательности проектирования систем.

Условием для создания гидротехнической системы является наличие водоисточника и земельного массива, на которой данная система создается для получения того или иного результата от работы воды в создаваемой гидротехнической системе. Если рассматривать в качестве примера мелиоративную гидросистему, направленную на увлажнение или осушение земель для получения устойчивых урожаев сельхозкультур, то в данном примере особенно наглядно видим смысл проектных и предпроектных проработок,

связанных с выбором разрабатываемого комплекса гидросооружений.

Сельскохозяйственные организации определяют структуру использования сельхозземель и набор сельскохозяйственных культур исходя, прежде всего, из климатических условий и условий извлечения максимальной прибыли. Поэтому в наборе сельскохозяйственных культур на основе только экономических соображений на орошаемых массивах появляются такие влаголюбивые культуры как рис, хлопок и другие, а на осушаемых – вместо трав овощные или зерновые культуры, которые экономически выгоднее, но требуют более высокой степени осушения земель.

В соответствии с намеченным составом сельскохозяйственных культур определяется для оросительной системы общее водопотребление, а для осушительной системы – норма или иначе степень осушения массива. Задачи проектировщиков далее, как правило, чисто технические – найти оптимальные технико-экономические решения для подачи и распределения воды на орошаемой территории и схему отведения на осушаемых массивах.

Сделаем акцент на том, что объем водопотребления и водоотведения определяются исходя из условия получения высокого урожая, но при этом упускается учет природных условий региона с точки зрения изменения их экологической составляющей и устойчивого развития. Но количество подаваемой или отводимой воды, безусловно, влияет и на изменение природных условий. Изменяется уровень и минерализация грунтовых вод, начинается засоление почв, возможно подтопление ниже расположенных земель и населенных пунктов. Это негативное воздействие может распространиться на растительный и животный мир, как на самой мелиорируемой площади, так и на прилегающей территории. И воздействие оросительной системы на природные условия региона тем больше, чем выше оросительная норма, подаваемая сельскохозяйственным культурам.

Осушение земель также меняет экологию района осушения и прилегающих территорий. И если на минеральных почвах это не столь катастрофично, то для торфяников это губительно, во-первых, из-за деградации и потери плодородия, а во-вторых, в засушливые годы приводит к их самовозгоранию. Если проектировщик будет проектировать осушительную систему по новым принципам, исходя, прежде всего, из принципа сохранения природных условий, то он либо

изменит структуру сельскохозяйственных земель, либо запроектирует оросительно-осушительную систему двустороннего регулирования, либо сделает вывод о нецелесообразности строительства объекта. И, безусловно, раз состав сельскохозяйственных культур, а, следовательно, и величина водоподачи на оросительной системе и норма осушения на осушительной системе имеют прямую связь с природными условиями, и если природные условия представляют для нас «ценность», то можно сделать вывод, что сформулированная ранее *идеология требует переосмысления с изменением её целей и задач, в которых должны быть отражены природные условия* орошаемого массива.

Представляется, что формулировка новой идеологии может быть следующей: получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур при условии, что изменения природных условий на нем не будут иметь негативных последствий.

Таким образом, *при проектировании необходимо определить все природные факторы и воздействия, на которые гидротехническая система влияет своей деятельностью.* Это и почвы, и уровень грунтовых вод, и их минерализация, и т.д. И среди всех этих факторов необходимо выделить те, которые представляют для нас ценность, и определить для каждого из этих факторов величину предельно допустимой нормы воздействия, то есть то количество воды, которое может быть подано на орошаемый массив, или то количество воды, которое может быть отведено с орошаемого массива без нанесения ему вреда.

Для каждого из выделенных природных факторов воздействия (почв, грунтовых вод и т.д.) величина этого допустимого воздействия индивидуальна. Максимальная их этих предельно допустимых норм воздействия должна явиться ограничителем при определении оросительных норм или норм осушения сельскохозяйственных культур.

При таком подходе проектировщик приходит в сельскохозяйственные организации для согласования структуры сельскохозяйственных культур с уже готовой предельно допустимой величиной оросительной нормы или нормы осушения, которые определены с учетом сохранения природных условий.

Как видим, изменение целей и задач в корне меняет и принципы проектирования гидромелиоративных систем и указывает, насколько важно обоснованное формулирование идеологии.

Важно отметить, что правильное формулирование целей и задач, обоснованное на примере гидромелиоративных системы, актуально для любого объекта, в котором деятельность человека соприкасается с природными условиями. Примером может служить также строительство гидроэлектростанций, добыча полезных ископаемых, сельское хозяйство и т.д.

Нам могут возразить, что в каждом проекте гидромелиоративной системы есть раздел охраны окружающей среды. Но цель этого раздела построена не на том, чтобы предотвратить вредные воздействия на природные условия мелиорируемого массива, а на том, чтобы бороться с уже возникшими негативными последствиями. При таком подходе мы боремся с последствиями действия мелиоративной системы, не пытаясь установить и предотвратить причины негативных воздействий. Борьба с последствиями деятельности мелиоративной системы в виде строительства дренажа, промывки засоленных земель, а на осушаемом массиве деградации торфяников и мероприятий по их тушению гораздо дороже и менее эффективна, чем предотвращение негативного воздействия гидромелиоративных систем и других «деятельных» объектов на окружающую среду.

#### Использованная литература:

1. Безносков, В. Н., Горюпова, С. В., Куткина, М. А., Попов, А. В., Седажин, В. П., Суздалева, А. А. Экологическая оптимизация гидротехнических сооружений: основные направления и концептуальные принципы // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2007. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-optimizatsiya-gidrotehnicheskikh-sooruzheniy-osnovnye-napravleniyai-kontseptualnye-printsipy> (дата обращения: 04.12.2023).
2. Трофимов, В. Т., Харькина, М. А., Барабошкина Т. А., Жигалин А. Д. Особенности изменений экологических функций абиотических сфер Земли в районах гидроэнергетических комплексов // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2017. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-izmeneniy-ekologicheskikh-funktsiy-abioticheskikh-sfer-zemli-v-rayonah-gidroenergeticheskikh-kompleksov> (дата обращения: 04.12.2023).
3. Суздалева А. Л., Безносков В. Н., Эль-Шаир Хаям И. А. Концепция экологической безопасности объектов гидроэнергетики. // Гидротехника 4 (21) / 2010 – 1(22) / 2011. С. 22-27. URL: [https://hydroteh.ru/upload/journals/files/hydro\\_04\\_2010\\_file\\_pdf\\_65\\_1\\_8783.pdf](https://hydroteh.ru/upload/journals/files/hydro_04_2010_file_pdf_65_1_8783.pdf)
4. Митина, Н.Н., Шумакова, Е.М., Ващенко, М.О. Регламентация эксплуатации приплотинных территорий крупных гидротехнических сооружений. // Водное хозяйство России. Научно-практический журнал №1, 2020г. - С. 72-91. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-1-5 <https://waterjournal.ru/files/wj/1582196879.pdf>
5. Кудаяров К.А. 2019.04.005. Карью А. Вода и обустройство территории в центральной Азии: важнейший ресурс развития требует переосмысления. // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Сер. 9, Востоковедение и африканистика: Реферативный журнал. 2019. №4. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/2019-04-005-karyu-a-voda-i-obustroystvo-territorii-v-tsentralnoy-azii-vazhneyshiy-resurs-razvitiya-trebuetsya-pereosmysleniya-cariou-a-l-eau-et-l> (дата обращения: 04.12.2023).

6. Янковская, Г. А. Негативные последствия советских гидроэнергетических проектов: форматы

и практики мемориализации // Сибирские исторические исследования. 2021. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/negativnye-posledstviya-sovetskih-gidroenergeticheskikh-proektov-formaty-i-praktiki-memorializatsii> (дата обращения: 04.12.2023).

---

## ВНЕДРЕНИЕ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В СФЕРЕ ДЕВЕЛОПМЕНТА И СТРОИТЕЛЬСТВА

---

*Зиборев Артем Васильевич*  
*Разработчик программного обеспечения*  
*Самара, Россия*

## INTRODUCTION OF RECOMMENDATION SYSTEMS IN THE FIELD OF DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION

*Artem Ziborev*  
*Software Developer*  
*Samara, Russia*

### АННОТАЦИЯ

В 21 веке, в период цифровизации особую роль приобрели рекомендательные системы, поскольку, собрав данные о человеке, они могут автоматически предлагать нужные для него вещи, так как задача рекомендательной системы – проинформировать пользователя о товаре, который ему может быть наиболее интересен в данный момент времени. Клиент получает информацию, а сервис зарабатывает на предоставлении качественных услуг.

В зависимости от модели бизнеса рекомендации могут быть его основой, как, например, у TripAdvisor, а могут быть просто удобным дополнительным сервисом (как, например, в каком-нибудь интернет-магазине одежды), призванным улучшить Customer Experience и сделать навигацию по каталогу более удобной.

Персонализация онлайн-маркетинга – очевидный тренд последнего десятилетия. По оценкам McKinsey, 35% выручки Amazon или 75% Netflix приходится именно на рекомендованные товары и процент этот, вероятно, будет расти. Рекомендательные системы – это про то, что предложить клиенту, чтобы сделать его счастливым.

А так как информации именно по рекомендательным системам в сфере девелопмента и строительства недостаточно, то автором в данной статье была выбрана цель, заключающаяся в изучении механизма рекомендательных систем, и их применения в сфере девелопмента и строительства.

Для того, чтобы суметь выполнить поставленную задачу автором были рассмотрены отечественные и зарубежные научные статьи, специализированная литература и мнения экспертов.

### ABSTRACT

In the 21st century, during the period of digitalization, recommendation systems have acquired a special role, since, having collected data about a person, they can automatically offer the things necessary for him, since the task of the recommendation system is to inform the user about the product that he may be most interested in at a given time. The client receives information, and the service earns money by providing quality services.

Depending on the business model, recommendations can be its basis, as, for example, TripAdvisor, or they can simply be a convenient additional service (as, for example, in some online clothing store) designed to improve Customer Experience and make catalog navigation more convenient.

Personalization of online marketing is an obvious trend of the last decade. McKinsey estimates that 35% of Amazon's revenue or 75% of Netflix comes from recommended products, and this percentage is likely to grow. Recommendation systems are about what to offer the client to make him happy.

And since there is not enough information on recommendation systems in the field of development and construction, the author in this article chose the goal of studying the mechanism of recommendation systems and their application in the field of development and construction.

In order to be able to fulfill the task, the author reviewed domestic and foreign scientific articles, specialized literature and expert opinions.

**Ключевые слова:** девелопмент, строительство, рекомендательные системы, внедрение рекомендательных систем.

**Keywords:** development, construction, recommendation systems, introduction of recommendation systems.

### Введение

В настоящее время пользователям становится трудно найти нужную информацию, в большом объеме данных, а производителям информации становится все труднее и труднее выделить свою собственную информацию из общей массы. В связи с чем актуальность приобретают рекомендательные системы [1]. Для наилучшего их понимания ниже будут представлены основные характеристики:

1. Объект рекомендации - что будет предложено. Здесь разнообразие огромно, начиная от товаров (Amazon, Ozon), статей (Arxiv.org), новостей (Surfingbird, Яндекс.Дзен), заканчивая изображениями (500px), видеороликами (YouTube, Netflix), музыкой (Last.fm, Pandora), плейлистами и многим другим.

2. Цель рекомендации - зачем предлагается. Это может быть покупка, получение информации, обучение, расширение круга общения.

3. Контекст рекомендации - что пользователь делает в данный момент. Например, просматривает товары, слушает музыку, общается с друзьями.

4. Источник рекомендации – кто рекомендует:

- аудитория (средний рейтинг ресторана в TripAdvisor),
- схожие по интересам пользователи,
- экспертное сообщество (бывает, когда речь о сложном товаре, таком, как, например, вино).

5. Уровень персонализации. Рекомендации бывают не персональными, когда человеку предлагается то же самое, что и всем, и более продвинутые, когда используются данные текущей сессии, например, последний просмотренный товар, чтобы предложить похожие. Персонализированные же рекомендации учитывают всю информацию о клиенте, включая историю покупок.

6. Прозрачность. Доверие к рекомендациям возрастает, если понятно, как они формируются. Что в свою очередь помогает избежать недобросовестных систем, продвигающих оплаченные товары или предлагающих более дорогие товары. Хорошая система рекомендаций также борется с мошенничеством.

7. Формат рекомендации. Это может быть всплывающее окно, отсортированный список в определенном разделе сайта, лента внизу экрана или что-то другое.

Таким образом, центром любой рекомендательной системы является матрица предпочтений. Она содержит всех клиентов сервиса по одной оси и объекты рекомендации по другой. В ячейках этой матрицы указаны оценки (рейтинги) - мера интереса пользователя к конкретному товару, выраженная на определенной шкале (например, от 1 до 5).

	Товар 1	Товар 2	Товар 3	Товар 4	Товар 5
Клиент 1		3		5	
Клиент 2	1		1	1	
Клиент 3	2			3	2
Клиент 4		4			5
Клиент 5	5		2	3	4

Рис.1. Принцип работы рекомендательной системы  
Fig.1. The principle of operation of the recommendation system

Пользователи обычно оценивают лишь небольшую часть товаров, что есть в каталоге, и задача рекомендательной системы – обобщить эту информацию и предсказать отношение клиента к

другим товарам, про которые ничего не известно. Другими словами, нужно заполнить все незаполненные ячейки на картинке выше [2].

В связи с чем плавно подошли к аспектам важности внедрения рекомендательных систем в современный бизнес:

1. Улучшение опыта покупателей. Так как они способны предоставить для потенциальных покупателей наилучшие варианты, подходящие под их запросы.

2. Оптимизация ресурсов. Данный аспект в свою очередь достигается за счет того, что рекомендательные системы помогают оптимизировать организациям траты на рекламу товара, т. к. собрав необходимые данные, проанализировав их, проще понимать, что нужно человеку.

4. Прогнозирование потребности рынка. Рекомендательные системы позволяют анализировать данные и выявлять тренды в поведении потребителей, в связи с чем можно создавать наиболее подходящие товары.

Принципы внедрения рекомендательных систем, сводятся к следующему:

1. В начале необходимо провести сбор данных и проанализировать их, так как от точности будет зависеть полезность рекомендаций.

2. В настоящее время в связи с ростом популярности ИИ также можно внедрить его в

бизнес-процессы, так как благодаря его возможности анализировать большие данные и обучаться в настоящее время, можно будет уменьшить штат сотрудников, а оставшимся заняться более важными задачами.

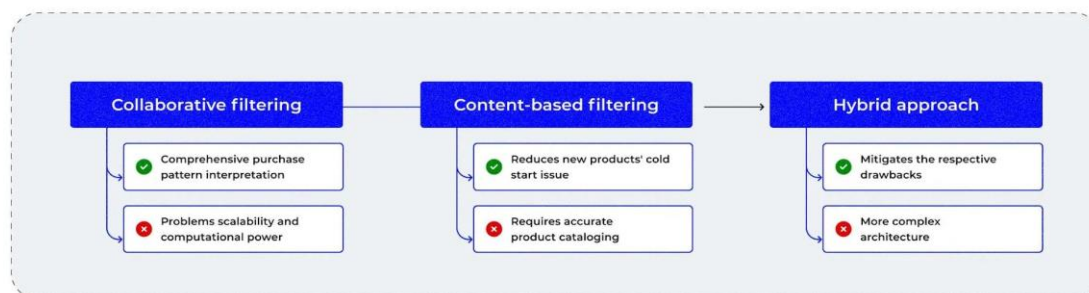
3. Понимая, что нужно потенциальным клиентам от здания, можно будет сгенерировать индивидуальное предложение под каждого клиента. Так, например, потребности молодой семейной пары, значительно отличаются от потребностей пожилой пары. И как раз данное понимание делает рекомендации более релевантными.

#### 1. Типы рекомендательных систем

Существует три основные подкатегории, к которым относится большинство систем рекомендаций, которые зависят от метода, используемого для выбора и предложения продуктов или услуг, удовлетворяющих индивидуальным потребностям каждого клиента.

- Совместная фильтрация;
- Фильтрация на основе контента;
- Гибридные рекомендательные системы.

## Recommendation system approaches in a nutshell



*Рис.2. Типы рекомендательных систем*

*Fig.2. Types of recommendation systems*

#### Совместная фильтрация.

В данном случае особое внимание уделяется клиентами и их впечатлениям от работы с онлайн-платформой, а не на технических характеристиках продуктов. Системы, подпадающие под этот тип,

используют алгоритмы машинного обучения для анализа отзывов пользователей и выявления их предпочтений. Это позволяет предлагать продукты схожим пользователям, исходя из их предпочтений и опыта.

## Collaborative Filtering

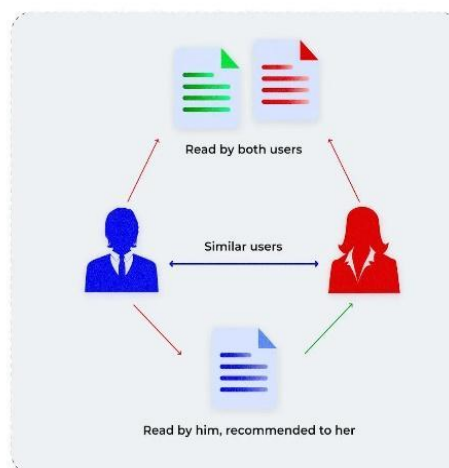


Рис.3. Принцип работы совместной фильтрации  
Fig.3. The principle of joint filtering

Таблица 1.

### Преимущества и недостатки совместной фильтрации рекомендательных систем

Table 1.

#### Advantages and disadvantages of joint filtering of recommendation systems

Преимущества	Недостатки
Расширение знакомства с множеством разнообразных продуктов.	Проблема "начального этапа" состоит в том, что у новых пользователей или товаров нет достаточных оценок или взаимодействий, что делает сложным предоставление им подходящих рекомендаций.
Не требуется экспертное знание в предметной области или глубокое понимание содержания товара.	Отсутствие достаточных данных — это ситуация, когда информации недостаточно для точного моделирования пользовательских предпочтений, что может привести к неудачным рекомендациям.
Отслеживание изменений в пользовательских предпочтениях в течение времени.	Проблема масштабирования возникает, когда рост числа пользователей и товаров ведет к экспоненциальному увеличению размера матрицы пользователь-товар.
Повышает удовлетворение пользователя, предоставляя рекомендации наиболее популярных товаров среди пользователей схожих интересов.	Проблема связана с конфиденциальностью, так как пользователи вынуждены предоставлять системе свои рейтинги или данные о взаимодействии.
Легкая разработка и простое применение модели.	Ограниченное разнообразие рекомендаций обусловлено тем, что системы часто предлагают популярные товары с высокими рейтингами.

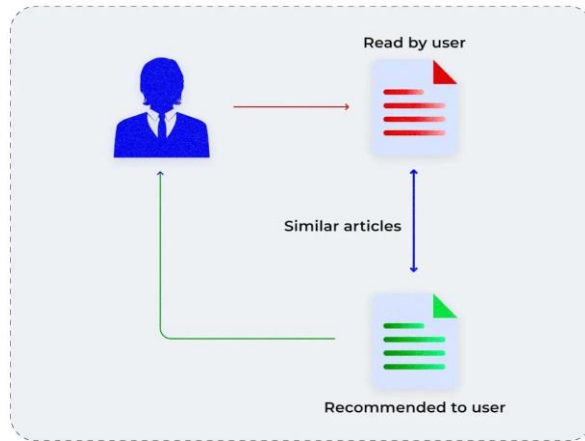
Фильтрация на основе контента.

Системы, базирующиеся на анализе контента, предлагают пользователям продукты, опираясь на их предыдущие действия и интересы. Они исследуют метаданные товаров, выделяя те, которые имеют схожие характеристики с другими, которые уже заинтересовали пользователя. Этот метод фокусируется на особенностях продуктов,

которые привлекли внимание пользователей, чтобы предложить им схожие товары. В отличие от совместной фильтрации, которая ищет общие черты между пользователями, фильтрация на основе контента активно применяется в электронной коммерции, новостных лентах и рекомендациях к музыке и фильмам.



### Content-Based Filtering



*Рис.4. Принцип работы фильтрации на основе контента*  
*Fig.4. How content-based filtering works*

### Преимущества и недостатки фильтрации на основе контента

Таблица 2.

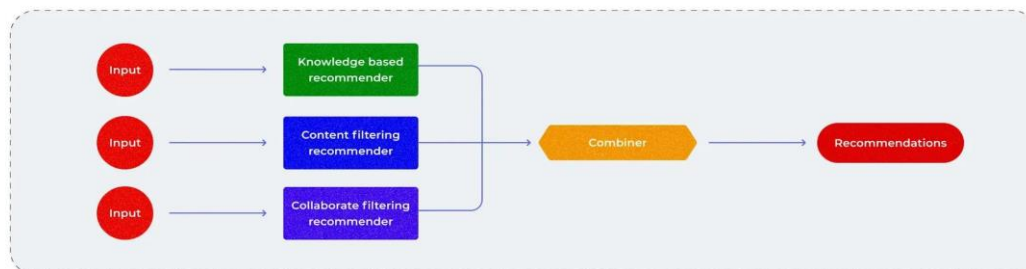
Table 2.

#### Advantages and disadvantages of content-based filtering

Преимущества	Недостатки
Системы контентной фильтрации функционируют независимо от данных о предпочтениях других пользователей, что упрощает их внедрение и может увеличить их масштабируемость.	Акцент на характеристиках, схожих с товарами, которые пользователь уже исследовал, может привести к отсутствию новизны и разнообразия в рекомендациях.
Такие системы способны мгновенно предлагать рекомендации для новых товаров, даже без ожидания обратной связи от пользователей или наличия дополнительных данных.	Неточности в рекомендациях могут возникнуть из-за ошибок в метаданных или недостаточной информации о характеристиках товаров.
Такие системы способны учитывать индивидуальные предпочтения пользователей и специфические характеристики продуктов, которые они ищут, что приводит к формированию более точных и релевантных рекомендаций.	Сложности возникают при рекомендации новых или непопулярных товаров, которые еще не получили оценок от большого числа пользователей.
Благодаря ясности и понятности, такие рекомендации могут быть легче интерпретированы, поскольку они основаны на конкретных характеристиках и атрибутах продуктов, а не на сложных взаимосвязях между пользователями и товарами.	

Гибридные системы. Гибридные рекомендательные системы по-разному сочетают в себе две или более рекомендательных стратегий, чтобы использовать их взаимодополняющие преимущества.

### Hybrid Systems



*Рис.5. Принцип работы гибридных систем*  
*Fig.5. The principle of operation of hybrid systems*



Таблица 3.

**Преимущества и недостатки гибридных систем**

Table 3.

**Advantages and disadvantages of hybrid systems**

Преимущества	Недостатки
Исправление данных может значительно повысить точность рекомендаций и расширить спектр предлагаемых разнообразных продуктов.	Для интеграции механизмов обоих подходов в единую систему требуются усовершенствованные вычислительные мощности и сложные архитектуры.
Возможность системы в обход ограничений присущих каждой позволяет предоставлять более индивидуализированные рекомендации, учитывая уникальные потребности каждого пользователя.	
Может значительно повысить эффективность механизмов рекомендаций в различных приложениях.	

2. Инструменты рекомендательных систем в сфере девелопмента и строительства

1. Системы управления контентом (CMS) и порталы недвижимости.

Данные платформы достаточно часто используют рекомендательные системы для предоставления индивидуальных рекомендаций по объектам недвижимости, с учетом потребности каждого клиента в силу того, что они анализируют предпочтения покупателей и предлагают им объекты, соответствующие их желанию.

2. Искусственный интеллект. Искусственный играет важную роль в разработке рекомендательных систем. Поскольку может анализировать большие данные, и принимать самостоятельные решения на основе имеющейся информации, следовательно может более точно предоставить тот объект недвижимости, который бы полностью удовлетворял покупателя.

3. Системы IoT. Данные системы могут собирать данные о параметрах недвижимости, которые необходимы разным покупателям и уже на основании собранных данных создаются рекомендации, соответствующие требованиям клиентов.

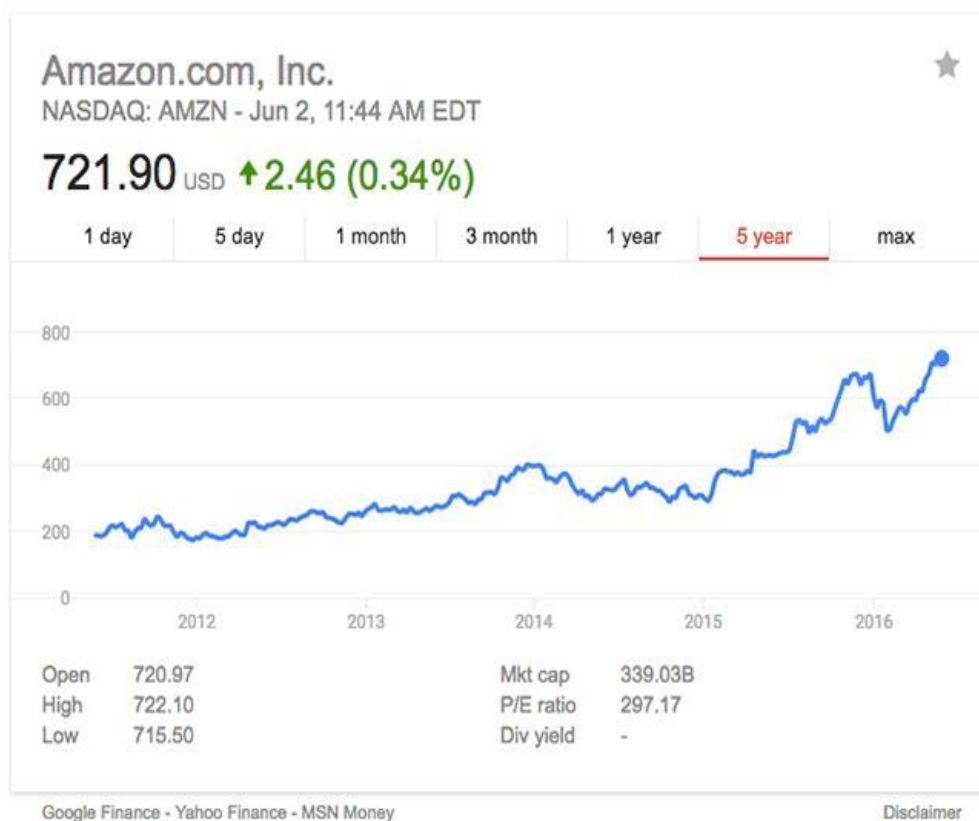
4. Системы геолокации. Благодаря геолокации можно собрать информацию о местоположении

клиента, и выдавать объекты недвижимости, которые находятся поблизости [3].

3. Преимущества и недостатки рекомендательных систем

В настоящее время большинство рекомендательных систем основаны на машинном обучении, поэтому их основные недостатки частично коррелируют с обычными проблемами, с которыми сталкиваются при разработке с использованием машинного обучения.

1 Увеличение доходов и продаж. Рекомендательные системы, как известно, могут оказать влияние на разные аспекты бизнеса. Так, например благодаря внедрению рекомендательных систем у компании Amazon, продажи выросли на 29% за год. Amazon проанализировала обычные покупки своих клиентов, извлекая информацию, недоступную обычным бизнес-аналитикам. Однако такой объем данных трудно обработать вручную, поэтому Amazon обратила внимание на машинное обучение и создала нейронную сеть, которая предсказывает будущие покупки пользователей, опираясь на их историю и предлагает следующий товар для покупки. Каждый клиент был также разделен на группы схожих по профилю покупателей, что позволило создать точные рекомендации товаров и повысить средний чек.



*Рис. 6. Рост цен на акции Amazon после интеграции механизма рекомендаций*  
*Fig.6. The growth of Amazon stock prices after the integration of the recommendation mechanism*

2 Повышение удовлетворенности покупателей. Как следует из вышесказанного, данное преимущество напрямую вытекает из первого – удовлетворенность пользователей. Когда пользователь видит персонализированный каталог, созданный системой рекомендаций, будь то в музыке, литературе, новостях, кино или электронной коммерции, он ощущает уменьшение стресса и более тесную связь с сервисом. Следовательно, предоставление персонализированных рекомендаций (основанных на корреляции с предыдущими покупками) и понимание потребностей пользователя (по данным о пользователях с аналогичными профилями) стимулируют дополнительные покупки.

3 Повышение оборота. Рекомендательные системы могут существенно увеличить оборот любого бизнеса. Эти системы анализируют поведение пользователей и учитывают связи между разными клиентами.

Однако, как и везде, в данной отрасли также есть свои недостатки, которые по больше степени сводятся к обучению искусственного интеллекта.

Так как из-за недостатка точных данных для обучения нейронных сетей невозможно создать эффективную рекомендательную систему, предлагающую точные рекомендации. Нейронные сети, стоящие за рекомендательными системами,

чрезвычайно чувствительны к качеству входных данных. Если данные неточны или неочищены, не получится достичь точных результатов [4,5].

4. Пример возможного использования рекомендательных систем

Для крупного застройщика Московской и Ленинградской областей разрабатывалась рекомендательная система. В процессе проектирования было принято решение прибегнуть к внедрению искусственного интеллекта, который способен обрабатывать огромные объемы данных и представлять проведенный анализ в удобной форме. Благодаря тому что, системы ИИ могут анализировать множество данных, уже на подготовительном этапе стало возможным выявлять проблемы и определять проблемные участки каждой конструкции. Что в свою очередь не только способствует повышению безопасности на стройплощадках, но и улучшает качество построенных зданий. Так многие застройщики уже успешно применяют искусственный интеллект для разработки сценариев "что, если" и планирования в случае непредвиденных обстоятельств. Это обеспечивает готовность к различным сценариям развития событий и помогает выбирать оптимальные решения в реальном времени [6].

Рынок ИИ в настоящее время выглядит следующим образом.

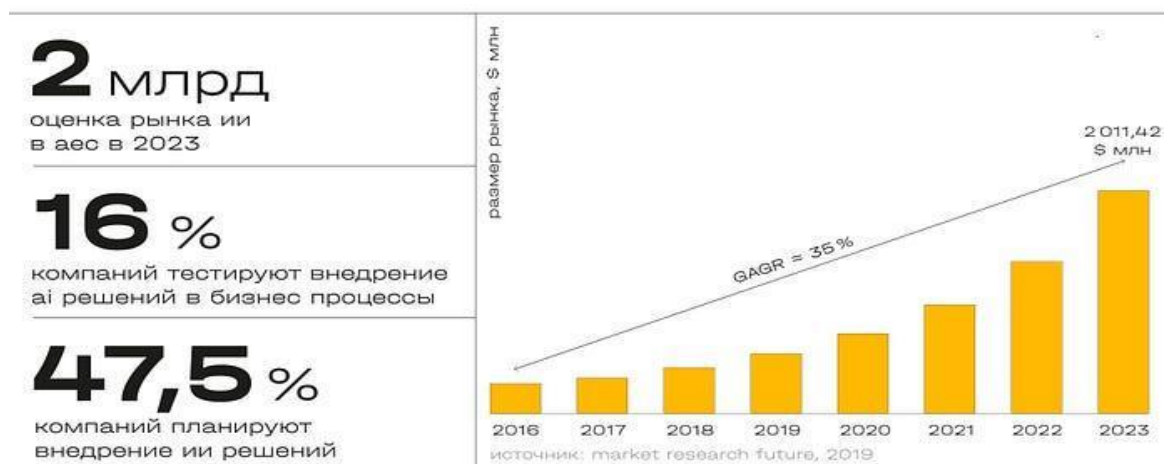


Рис.7. Рынок искусственного интеллекта  
Fig.7. Artificial Intelligence market

ИИ-технологии в некоторых этапах строительства

1 Планирование и проектирование. Применение искусственного интеллекта на подготовительном этапе строительства является важным аспектом реализации проектов. Эффективная подготовительная работа гарантирует завершение проекта в установленные сроки и в рамках бюджета. На этапе подготовки к строительству внимательное планирование и аналитика играют ключевую роль, особенно учитывая различные переменные, такие как тип объекта (гостиница, школа, дорога, мост), методы работы и объем задач, а также характер проекта - государственный или частный. Благодаря использованию компьютерного зрения стало возможно анализировать снимки полученные со спутников с целью обнаружения аналогичных территорий (Skyeer, Геоалерт, Геоинтеллект, Terrapattern и Descartes labs) [7].

Далее при разработке проекта искусственный интеллект трансформирует существующую концепцию в детализированный план. Применение новых методов и инструментов, предоставленных ИИ, повышает эффективность и качество разработки проекта, включая архитектурные чертежи и схемы инженерно-коммуникационных сетей.

2 Работа с документацией. В данном случае ИИ автоматизирует извлечение и анализ данных из рабочей документации. Технологии обработки текстов позволяют создавать подробные документы, основанные на двумерных чертежах, что экономит время и ресурсы, устраняя необходимость вручную вводить данные в таблицы [8].

Таким образом анализ данных в строительстве представляет собой методику сбора, анализа и интерпретации данных, которая помогает строительным компаниям извлекать ценные сведения и делать более обоснованные решения. Аналитика данных в строительстве обеспечивает строительным фирмам возможность принимать обоснованные решения на основе объективных

фактов и тщательного анализа, что способствует более эффективному управлению проектами и повышению качества строительных работ [9].

С учетом вышеизложенного алгоритм работы будет выглядеть следующим образом:

1.Застройщик на карте выбирает необходимый участок, который планируется к застройке.

2.Система с ИИ исходя из полученных координат начинает исследовать место, используя данные, полученные с платформ ЦИАН, АВИТО и иных открытых баз данных.

3.Затем застройщиком указываются фильтры, к которым можно отнести:

а) расстояния до остановок общественного транспорта, станций метро, вокзалов, аэропортов;

б) расстояния до социальных объектов (школы, больницы и т.д);

в) расстояния до крупных автомагистралей (МКАД и т.д);

г) расстояния до платных и бесплатных парковок.

После чего, данная система благодаря полученным данным и выбранным фильтрам, которые индивидуальны для каждого отдельного случая выдает рекомендации, что следует строить на данном объекте, будь то коммерческая недвижимость, либо же некоммерческое здание, определяет какое количество этажей возможно возвести. Далее начинается анализ полученной информации с экономической точки зрения, в данном случае система прогнозирует рыночную стоимость за квадратный метр с учетом всех возможных затрат.

#### Заключение

Таким образом можно сказать, что рекомендательные системы в сфере девелопмента и строительства могут изменить условия работы компаний. Однако для повышения эффективности рекомендательных систем важно понимать и анализировать сложные взаимосвязи между пользователями, продуктами и их предпочтениями. Путем постоянного анализа этих взаимосвязей рекомендательные системы могут создавать не только удобные, но и вдохновляющие

пользовательские опыты, что, в конечном итоге, удерживает пользователей и способствует росту компании.

### Литература

1 Краткое введение в систему персонализированных рекомендаций. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://russianblogs.com/article/67031290674> /.- (дата обращения 09.10.2023).

2 Анатомия рекомендательных систем. Часть первая. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/lanit/articles/420499/>.- (дата обращения 09.10.2023).

3 Как нейросети и машинное обучение меняют девелопмент. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://stroygaz.ru/publication/technologies/kak-neyroseti-i-mashinnoe-obuchenie-menyayut-development/?ysclid=lnraybptmf310903494>.- (дата обращения 09.10.2023).

4 Recommendation Systems: Benefits And Development Process Issues. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://azati.ai/recommendation-systems-benefits-and-issues/?ysclid=lnozwwvz59971506128>.- (дата обращения 09.10.2023).

5 Recommender System Using Machine Learning. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://maddevs.io/blog/recommender-system-using-machine-learning/>.- (дата обращения 09.10.2023).

6 Как искусственный интеллект меняет строительную отрасль. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.planradar.com/ru/kak-iskusstvennyj-intellekt-menyaet-stroitelnyu-otrasl/?ysclid=lnyzzwbt73681877565>.- (дата обращения 20.10.2023).

7 ИИ въезжает в стройку. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://medium.com/ai-urbanism/и-въезжает-в-стройку-26529add1420>.- (дата обращения 20.10.2023).

8 ИИ распространяется в строительной области. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://pro-tim.ru/blog/ii-rasprostranyaetsya-v-stroitelnoy-oblasti/?ysclid=lnyzzwqjod7209661793>.- (дата обращения 20.10.2023).

9 12 Most Prominent Use Cases of Construction Data Analytics. [Электронный ресурс] Режим

доступа: <https://pixelplex.io/blog/data-analytics-in-construction/>.- (дата обращения 20.10.2023).

### References

1 Brief introduction to the personalized recommendations system. [Electronic resource] Access mode: <https://russianblogs.com/article/67031290674> /.- (accessed 09.10.2023).

2 Anatomy of recommendation systems. Part one. [Electronic resource] Access mode: <https://habr.com/ru/companies/lanit/articles/420499/>.- (accessed 09.10.2023).

3 How neural networks and machine learning are changing development. [Electronic resource] Access mode: <https://stroygaz.ru/publication/technologies/kak-neyroseti-i-mashinnoe-obuchenie-menyayut-development/?ysclid=lnraybptmf310903494>.- (accessed 09.10.2023).

4 Recommendation Systems: Benefits And Development Process Issues. [Electronic resource] Access mode: <https://azati.ai/recommendation-systems-benefits-and-issues/?ysclid=lnozwwvz59971506128>.- (accessed 09.10.2023).

5 Recommender System Using Machine Learning. [Electronic resource] Access mode: <https://maddevs.io/blog/recommender-system-using-machine-learning/>.- (accessed 09.10.2023).

6 How artificial intelligence is changing the construction industry. [Electronic resource] Access mode: <https://www.planradar.com/ru/kak-iskusstvennyj-intellekt-menyaet-stroitelnyu-otrasl/?ysclid=lnyzzwbt73681877565>.- (accessed 10/20/2023).

7 AI enters the construction site. [Electronic resource] Access mode: <https://medium.com/ai-urbanism/и-въезжает-в-стройку-26529add1420>.- (accessed 20.10.2023).

8 AI is spreading in the construction field. [Electronic resource] Access mode: <https://pro-tim.ru/blog/ii-rasprostranyaetsya-v-stroitelnoy-oblasti/?ysclid=lnyzzwqjod7209661793>.- (accessed 10/20/2023).

9 12 Most Prominent Use Cases of Construction Data Analytics. [Electronic resource] Access mode: <https://pixelplex.io/blog/data-analytics-in-construction/>.- (accessed 20.10.2023).

УДК 614.841.45:621.316.9

---

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. КУМУЛЯЦИЯ ТЕПЛА  
И МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ЗАЖИГАНИЯ**

---

*Мельников Владимир Семенович*  
кандидат технических наук

**FIRE SAFETY OF ELECTRICAL INSTALLATIONS.  
HEAT ACCUMULATION  
AND MODIFICATIONS OF THE IGNITION ALGORITHM***V.S. Melnikov*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.114.1.1916

**АННОТАЦИЯ**

Необратимые повреждения частей электроустановок возникают в определённой последовательности и зависят от кумуляции тепла. Видеофиксация и термография при моделировании аварийных режимов позволили прийти к обобщению результатов ряда экспериментов в виде двух алгоритмов. Блок-схема первого отображает развитие процесса нагрева, воспламенения изоляции и разрыва цепи. Вторая блок-схема отличается тем, что учитывает возможность вторичных замыканий. Оба алгоритма завершаются плавлением проводника, после которого в отдельных экспериментах наблюдалось саморегулирование дуги (несколько вторичных замыканий). На основании установленных закономерностей процесса составлен рейтинг средств защиты. Отмечено, что полноценное решение задачи обеспечения пожарной безопасности заключается в совместном контроле электрических и неэлектрических показателей.

**ABSTRACT**

Irreversible damage to parts of electrical installations occurs in a certain sequence and depends on the accumulation of heat. Video fixation and thermography in the simulation of emergency modes allowed us to generalize the results of a number of experiments in the form of two algorithms. The flowchart of the first one shows the development of the heating process, ignition of insulation and circuit break. The second block diagram differs in that it takes into account the possibility of secondary closures. Both algorithms end with melting of the conductor, after which self-regulation of the arc (several secondary closures) was observed in separate experiments. Based on the established patterns of the process, a rating of protective equipment has been compiled. It is noted that a full-fledged solution to the problem of fire safety is the joint control of electrical and non-electrical indicators.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, электроустановка, активная защита, алгоритм зажигания  
**Keywords:** fire safety, electrical installation, active protection, ignition algorithm,

\*\*\*

**ВВЕДЕНИЕ**

Кумуляция тепла для электроустановок и их частей возникает в результате

теплового действия электрического тока и ограниченного рассеяния тепла. Электротехнические характеристики проводников при этом влияют на ток и падение напряжения, лимитируя тепловой эффект по закону Джоуля-Ленца. В свою очередь теплотехнические характеристики материалов и окружающей среды влияют на теплоотдачу. Совместное проявление

всех факторов приводит к широкому разнообразию пожароопасных режимов, но их тем не менее удаётся представить в виде типовых графов [1] и алгоритмов зажигания [2]. Такая формализация и обобщение необходимы для обоснования выбора технологий защиты [3, 4]. Настоящая статья посвящена развитию указанного подхода с целью более полного учёта результатов расследования реальных пожаров. Их последствия остро проявляют статистические показатели (см. табл. 1).

## Количество пожаров и число погибших в РФ [5]

Год	Количество пожаров, всего	Количество из-за НПУиЭ электрооборудования	
		во всех объектах	в жилом секторе
2022	352 602	58 278	43 459
2021	390 859	57 766	44 464
2020	439 394	51 930	40 026
2019	471 537	49 638	38 489
2018	-	41 763	34 126

Год	Количество погибших, всего	Погибло из-за НПУиЭ электрооборудования	
		во всех объектах	в жилом секторе
2022	7 776	2 058	1 988
2021	8 473	2 325	2 200
2020	8 313	1 942	1 848
2019	8 567	2 034	1 953
2018	7 913	1 091	1 824

Обратим внимание на то, что за пять лет (с 2018 по 2022 год) имело место последовательное уменьшение общего количества пожаров, но количество пожаров из-за нарушения правил устройства и эксплуатации (НПУиЭ) электрооборудования увеличивалось, особенно в жилом секторе. Не уменьшалось и число погибших при пожарах.

Таким образом актуальность выбранной темы связана с необходимостью существенного улучшения организационных мероприятий и технических средств, исключающих возникновение пожаров на объектах защиты. И тут следует отметить, что недостатки существующих систем предотвращения пожаров в основном известны. Сложившееся положение дел связано с эксплуатацией электрооборудования сверх установленных сроков службы и с несоответствием электроустановок современным нормам. Также с тем, что техническое обслуживание в жилых домах ограничивается заменой счётчиков и осмотром этажных щитов. Крайне медленно распространяются современные системы помощи человеку. Например, даже в проектах и в типовых комплектах, которые выпускаются под названием «Умный дом», пожарной сигнализации либо вообще нет, либо она упоминается в последнюю очередь. Также средства пожарной автоматики редко применяются в частных домах городов, сельской местности и тем более в постройках миллионов садовых участков. Управляющие компании многоквартирных домов после 20...30

лет их эксплуатации как правило не поддерживают пожарную сигнализацию в рабочем состоянии. Для новых многоквартирных домов системы электроснабжения и пожарной сигнализации проектируются обособлено. При этом в электроустановках предусматривается контроль только электрических показателей, а контроль температуры реализован лишь для электронагревательных приборов. И даже на производственных объектах не применяется координация действий пожарной автоматики и технических средств управления электроустановками. Фактически остаются без внимания давно существующие требования «Технического регламента...» (Федерального закона 123-ФЗ от 22.07.2008), в том числе Статей 82, 83.

Рациональный подход к устранению указанных недостатков обязывает ориентировать исследования на выделение тех показателей, контроль которых впоследствии позволит исключить человеческий фактор и максимально автоматизировать предотвращение пожаров. Причём в центре внимания должен быть наиболее уязвимый жилой сектор. Соответственно при постановке экспериментов будет полезно учитывать пожарную опасность некоторых наиболее часто встречающихся веществ и материалов. Для них в табл. 2 выписаны основные температуры, которые следует сравнивать с температурами источников зажигания, возникающих в электроустановках.

## Показатели пожарной опасности веществ и материалов [6]

Вещества	Температуры, °С			
	воспламенения	вспышки	самовоспламенения	тления
Бумага			230	360
Масло кукурузное		254	390	
Масло оливковое		244	380	
Масло подсолнечное		205	370	
Метан			535	
ПВХ изоляция			440...550	
Хлопок	210		407	

Важно то, что температуры, характеризующие пожарную опасность, оказываются ниже температур плавления металлов, используемых для изготовления проводников и деталей их соединений (меди – 1083°С, алюминия – 660°С), а также ниже температуры рабочей поверхности конфорок электроплит, которая по п. 2.6 ГОСТ 14163-88 должна находиться в пределах 450...550°С. Следовательно воспламенение горючих материалов вполне возможно без плавления даже алюминия при непосредственном контакте с твёрдыми нагретыми поверхностями или за счёт бесконтактного нагрева (индукционного или от теплового излучения).

Длительно действующими потенциальными источниками зажигания являются исправные электронагревательные приборы. Причём, воспламенение горючих материалов от них происходит без изменений каких-либо электрических показателей (при нормальном режиме эксплуатации). Соответственно для предотвращения пожара необходим контроль неэлектрических показателей (температуры, дымообразования и т.д.) [1, 3]. И, конечно, контроль состава воздуха необходим там, где используется природный газ (метан) [4]. При его утечке воспламенение чаще всего происходит от искрения в выключателях и реже от нагретых поверхностей. Это связано с тем, что метан имеет довольно высокую температуру самовоспламенения (см. табл. 2), но легко проникает внутрь выключателей в зону контактов.

Аварийные режимы работы электроустановок и их частей часто характеризуют кратностью токов

перегрузки. С этим показателем связывают вероятность зажигания изоляции, и в монографии [7] приведено несколько результатов таких исследований. Они показывают, что воспламенение происходит если кратность тока перегрузки находится в установленных пределах. Условия ниже нижнего предела соответствуют относительно медленному нагреву, при котором температура определяется тепловым балансом квазистационарного состояния и оказывается меньше температуры самовоспламенения ПВХ изоляции (440...550°С по табл. 2). Если кратность тока перегрузки будет выше верхнего предела, проводник плавится, выполняет роль предохранителя, и нагрев мгновенно прекращается. Зажигающая способность дугового пробоя и расплавленного металла низкая, соответственно вероятность зажигания стремится к нулю. Т.е. без достаточной кумуляции тепла не происходит и воспламенения изоляции. Такая предварительная оценка необходима для понимания результатов выполненных экспериментов.

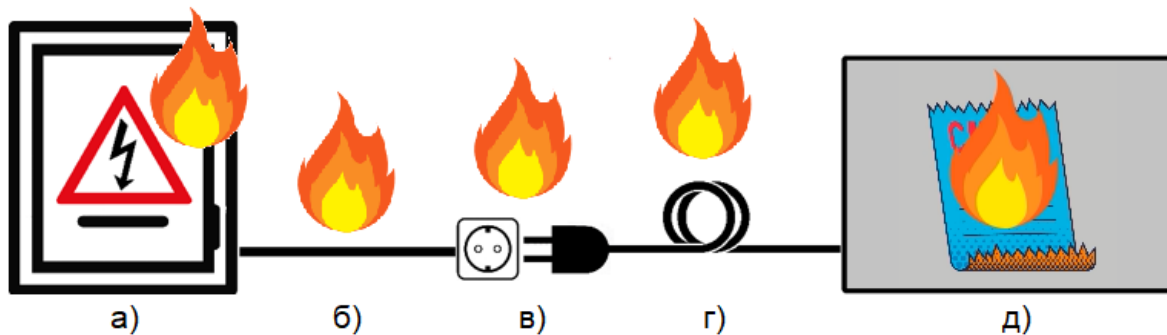
\*\*\*

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как и в предыдущей работе [8] основной метод исследования связан с натурным (физическим) моделированием, которое выполняется так, чтобы источник зажигания, очаг пожара и пожарная нагрузка по характеру, величине, способу размещения и т.п. соответствовали реальным условиям эксплуатации.

Варианты появления очага пожара в разных частях электроустановки показаны на схеме рис. 1.



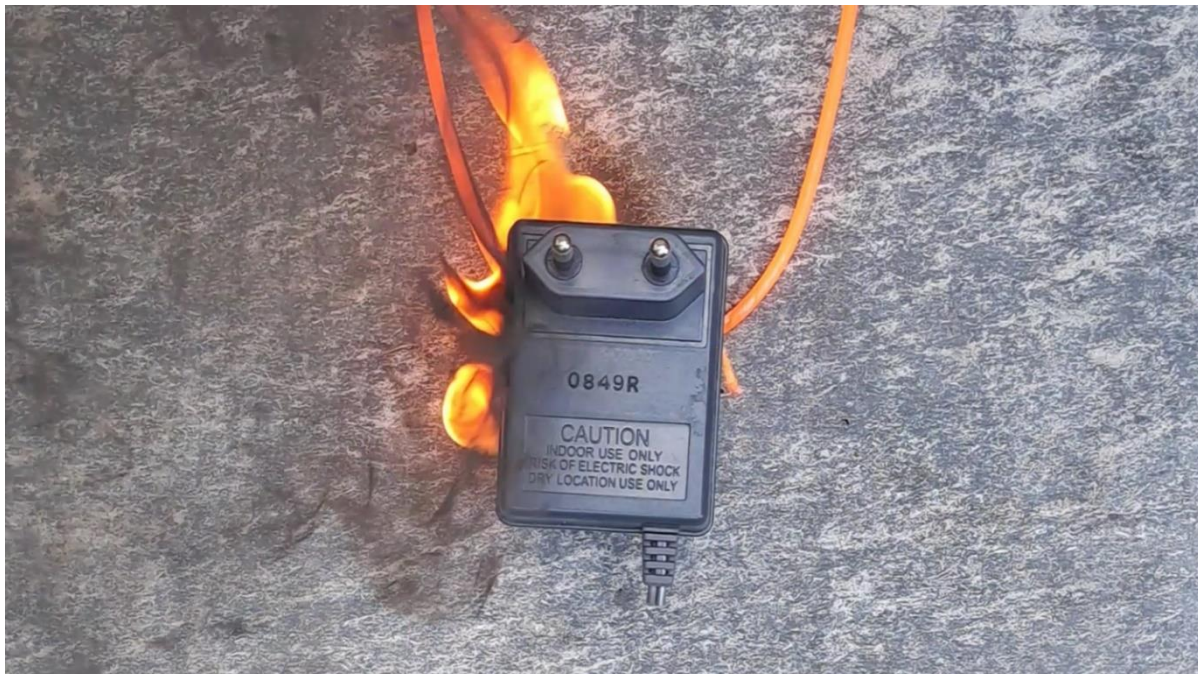


*Рис. 1. Пожароопасные части: электрицит (а), кабель (б), разъёмное соединение (в), шнур (г), электроприбор (д).*

Поскольку пожары электрошита и кабеля (рис. 1 а, б) изучались отдельно, в рамках настоящей работы рассматривались ответвления, т.е. части наименее защищённые от сверхтоков. Соответственно для исследования выбраны вилки и шнуры (рис. 1 в, г), также проводники и детали их соединений внутри электроприбора. Последний вариант на схеме (рис. 1д) объединён с вариантом пожара при исправном оборудовании, и здесь уместно повторить, что велика вероятность воспламенения горючих материалов от нагретых поверхностей даже исправных электроприборов и газа от исправных выключателей в нормальном режиме эксплуатации. Далее приведены примеры выполненных исследований.

### **1. Исследование пожарной опасности адаптеров.**

Блоки питания, совмещённые с вилками, чаще другого оборудования остаются под напряжением без присмотра, поэтому практический интерес представляет изучение их реакции на перенапряжения и неисправности. В качестве образцов были отобраны 23 модели с трансформаторами и без трансформаторов, предназначенные для питания бытовых приборов и зарядки аккумуляторов от сети 230 В. Материалы корпусов адаптеров были проверены на горючесть при воздействии пламени горелки и раскалённой поволоки. В результате для всех моделей установлено воспламенение с обильным дымообразованием (см. рис. 2), также выявлено самозатухание после прекращения огневого и теплового воздействия.



*Рис. 2. Реакция самозатухающего материала корпуса адаптера при контакте с раскалённой поволокой при температуре 600°С.*

Испытания при повышенном напряжении показали, что кумуляция тепла, необходимая для воспламенения материала корпуса может возникнуть при среднем перенапряжении (300...370 В) и относительно медленном нагреве.

Однако этого как правило не случается при обрыве нейтрального проводника и существенном перекасе фаз с максимальным перенапряжением 400...420 В. В таком аварийном режиме высокая кратность тока перегрузки проводников в цепях



адаптера приводит к быстрому расплавлению металла и прекращению нагрева. Проводники фактически срабатывают как предохранители. Опасная кумуляция тепла аналогично может случиться при постепенном нагреве из-за межвитковых замыканий трансформаторов или перегрузки и повреждении вторичных цепей.

## 2. Исследование пожарной опасности разъёмных соединений

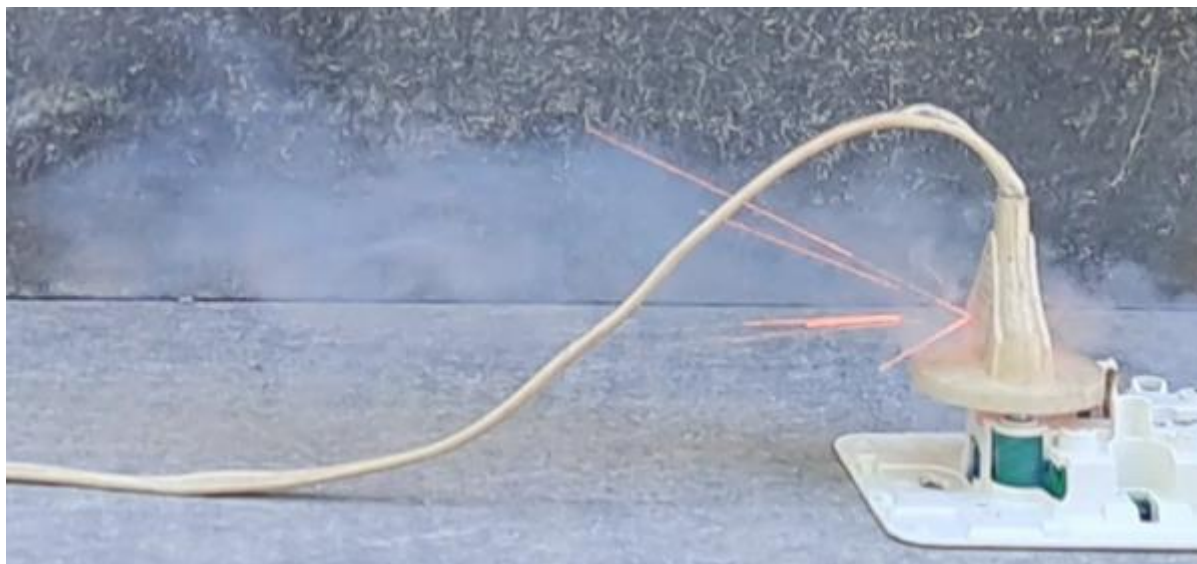


Рис. 3. Плавление проводника в неразъёмной вилке с выбросом искр и дымообразованием при токе перегрузки 25 А для проводников сечением 0,5 мм<sup>2</sup>

В данном тесте питание осуществлялось последовательно через автоматический выключатель с номинальным током 32 А (С32) и автоматический выключатель с номинальным током 25 А (С25), совмещённый с детектором дугового пробоя (далее выключатель дуги). Для двухжильных шнуров сечением медных жил 0,5 мм<sup>2</sup>, температуры жил +65°C и окружающего воздуха +25°C допустимый длительный ток – 12 А (см. ПУЭ-7, п. 1.3.10, Таблица 1.3.8). Соответственно кратность тока перегрузки 25/12≈2 и фактически меньше нижнего предела диапазона воспламенения изоляции [7]. Также по таблицам для вставок плавких предохранителей находим, что условный ток плавления меди сечением 0,5 мм<sup>2</sup> составляет около 60А. Исходя из этого, можно было ожидать только нагрев без плавления проводника и без воспламенения изоляции.

При проведении эксперимента одновременно с видеозаписью выполнялась запись термофильма, и тепловизор зафиксировал рост температуры шнура с первых секунд после подключения нагрузки. Это важно отметить для организации контроля и своевременного выявления опасного (аварийного) режима.

За время нагрева тепловизор зафиксировал то, что температура на поверхности изоляции шнура подошла к значению 160°C. По ГОСТ 31996-2012, п. 10.7, табл.18 для жил кабельной продукции установлены четыре граничные температуры: 70°C

Нагрев розеток и вилок в случае появления дефектов ранее рассмотрен в работе [3]. Теперь представим результаты экспериментов с полностью исправными компонентами.

### Тест 2.1

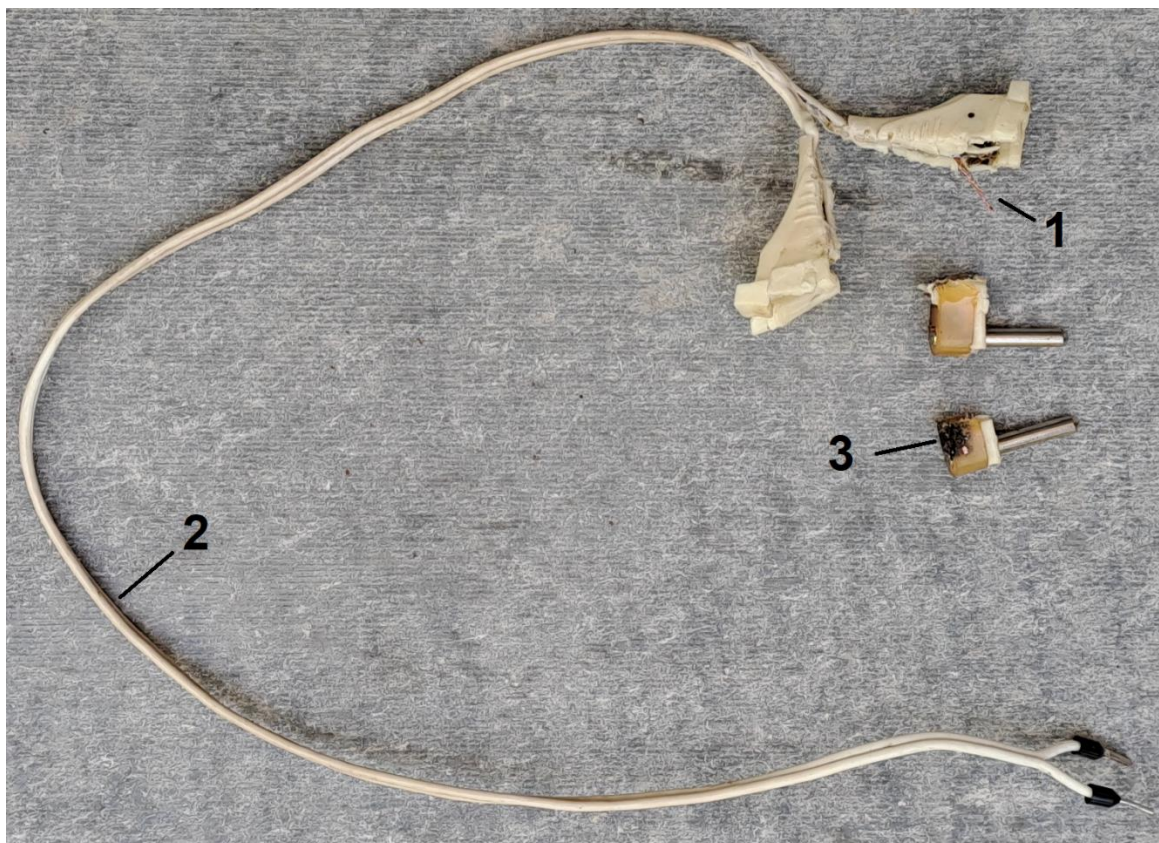
Стоп-кадр видеозаписи одного из опытов показан на рис. 3.

– длительно допустимая, 90°C – в режиме перегрузки, 160°C – предельная при коротком замыкании, 350°C – по условию невозгорания при коротком замыкании. Сравнивая эти температуры с показаниями тепловизора, также можно было ожидать, что процесс приведёт только к нагреву.

Тем не менее за счёт кумуляции тепла внутри вилки температура проводника превысила температуру плавления меди, произошёл разрыв цепи с выбросом искр. До этого нагрев продолжался 6,5 мин, он сопровождался появлением запаха расплавленного поливинилхлорида и примерно на 2-й минуте заметным выходом газообразных продуктов пиролиза изоляции.

Для исключения ошибки, связанной с дефектом конкретного изделия, тест повторяли 10 раз с неразъёмными вилками и шнурами разных производителей. Это подтвердило полную повторяемость необратимых повреждений, которые отмечены на фотографии (рис. 4).

Выполненные тесты показали, что в нескольких случаях выключатель дуги реагировали на дуговой пробой, но отключение происходило на последней стадии, т.е. тогда, когда проводник уже расплавился и сам выполнил роль предохранителя. Соответственно вилка и шнур получили все необратимые повреждения. Поэтому никакой пользы от действий выключателя дуги уже не было.



*Рис. 4. Необратимые повреждения вилки и шнура: 1 – плавление и разрыв проводника, 2 – плавление и пиролиз изоляции, 3 – плавление, пиролиз и воспламенение изоляции.*

### **Тест 2.2**

Стоп-кадр видеозаписи другого опыта с разъёмным соединением и шнуром показан на рис. 5. Отличие от предыдущего заключается в выборе тока перегрузки. Он составил около 120 А. Для медного проводника сечением 1,5 мм<sup>2</sup> такой ток

близок к условному току плавления. Допустимый длительный ток равен 20 А (см. ПУЭ-7, п. 1.3.10, Таблица 1.3.8), и кратность тока перегрузки ( $120/20=6$ ) находится в средней части диапазона воспламенения изоляции [7].



*Рис. 5. Пламенное горение неразъёмной вилки и изоляции шнура (3x1,5 мм<sup>2</sup>) при токе 118...123 А.*

Ещё раз отметим, что тепловизор зафиксировал рост температуры сразу после

подключения нагрузки, и через минуту после начала нагрева температура превысила 400°C. В это



время возник выброс пламени из вилки. Т.е. внутри неразборной вилки кумуляция тепла вновь оказалась наибольшей. Затем горение распространилось вдоль шнура.

Характерный запах и дымообразование были замечены намного раньше воспламенения (через 10...15 сек после подключения нагрузки).

Расплавление проводника и в этом случае произошло практически одновременно с выбросом пламени. Проводник выполнил роль предохранителя и резистивный нагрев прекратился.

Данный тест также был выполнен 10 раз с неразборными вилками и шнурами разных производителей, что подтвердило полную повторяемость необратимых повреждений.

### 3. Исследование пожарной опасности жгутов и кольцевых укладок

Пример кумуляции тепла для жгутов ранее был приведён в связи с моделированием пожара электрошита [8]. Аналогичное более существенное повреждение изоляции возникает из-за концентрированного действия резистивного нагрева и ограничения теплоотдачи в кольцах. Постановка соответствующих экспериментов была выполнена с неразборными вилками и шнурами. При этом конструктивные параметры и ток перегрузки были такие же, как в тестах 2.1. И только за счёт иной укладки шнура были получены другие результаты (см. рис. 6.).

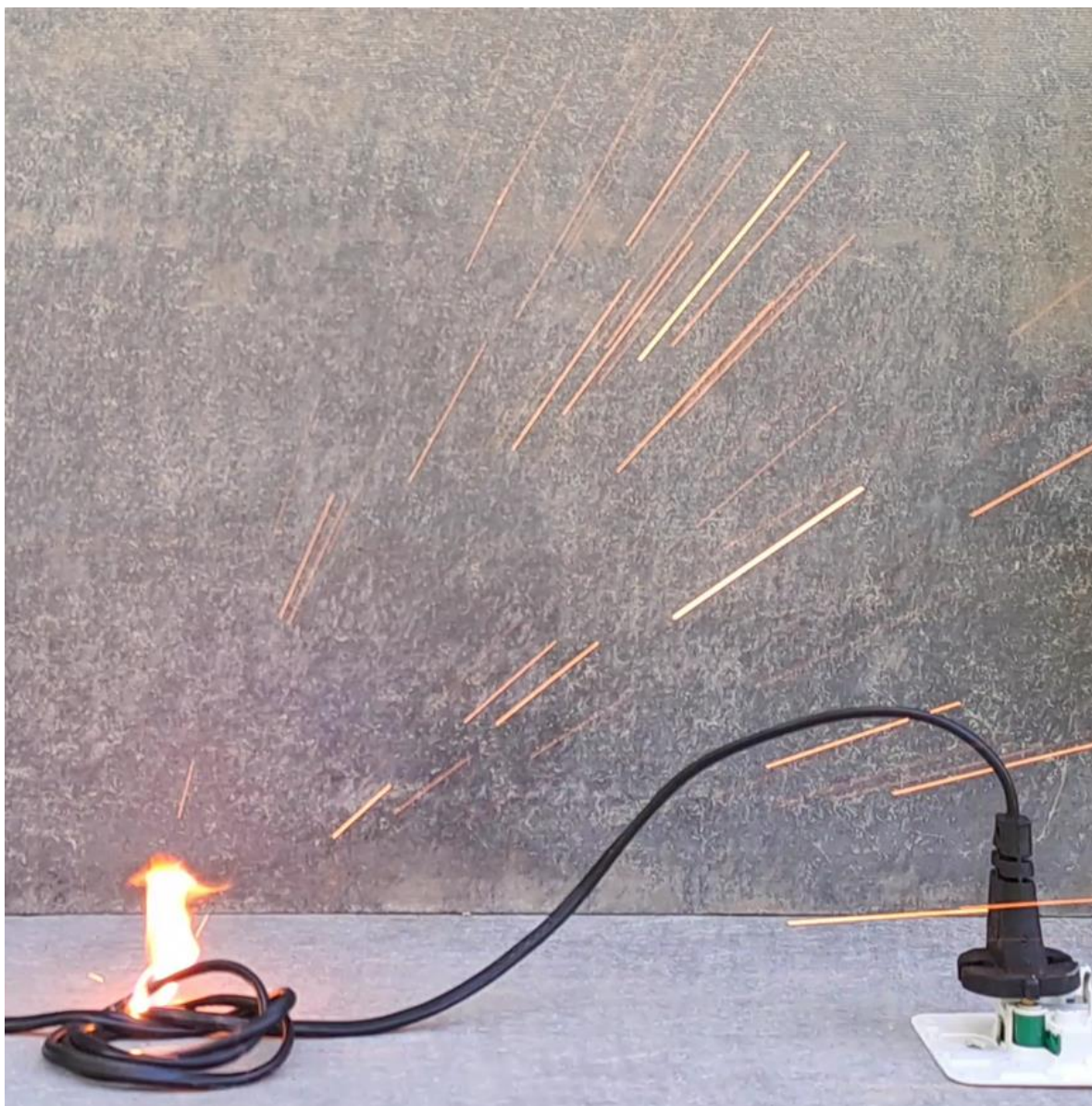


Рис. 6. Плавление проводника в кольце шнура ШВВП 2х0,5 с воспламенением изоляции при токе перегрузки 25 А

Вместо плавления проводника в вилке во всех тестах с кольцами получено опережающее замыкание между витками, там же воспламенялась

изоляция, проводники плавилась, после чего резистивный нагрев прекращался.

Тепловизор и в этих экспериментах фиксировал нагрев с первых секунд после

подключения нагрузки. Также до замыкания проявлялись запахи и дымообразование. И затем при плавлении проводника происходило отключение автоматических выключателей С32, С25 (из-за короткого замыкания), причём детектор дуги просто отставал от реакции автоматических выключателей.

Заметим, что кумуляция тепла в данном случае сама не приводила к плавлению металла. За две минуты нагрева хватало только для повреждения изоляции. В результате в месте пересечения витков возникло замыкание проводников. При расследовании пожаров такие замыкания считаются вторичными. В нашем случае именно вторичные замыкания вызывали отключение автоматических выключателей первой и второй ступени. Но проводники и сами играли роль предохранителей. И после каждого опыта было видно, что они разорваны на расстоянии в несколько миллиметров. Плавление проводников сопровождалось параллельным дуговым пробоем. Защита срабатывала, только и в этих тестах поставленную задачу она не решила. Шнуры

получали необратимые повреждения и не была исключена угроза пожара.

#### 4. Исследование кумуляции тепла для кабеля ППГнг(А)-HF 3x1,5

Реакция на резистивный нагрев проводников распространённых кабелей (ВВГ, NYM) хорошо известна. Повышение температуры изоляции приводит к образованию газообразных продуктов деструкции, которые легко разрывают оболочку во многих местах по всей длине образца, и также по всей длине через разрывы выходит дым. Воспламенение возникает в зависимости от кратности тока перегрузки.

Оболочки из полимерной композиции пониженной горючести без галогенов выдерживают более высокое давление, и вместо равномерного выхода дыма возникает кумулятивный выброс газообразных продуктов деструкции. На стоп-кадрах видеозаписи такого процесса (рис. 7) видно, что выброс с края оболочки мог сопровождаться мощным пламенным горением ещё до момента плавления проводника (рис. 7 а). Соответственно разрыв цепи с дуговым пробоем возникал позже воспламенения (рис. 7 б).



Рис. 7. Результат кумуляции тепла для кабеля ППГнг(А)-HF 3x1,5 при токе 125А и кратности тока перегрузки 125/20≈6: а) выброс пламени из оболочки, б) плавление проводника

Повторение этого эксперимента выявило некоторые вариации. Так, для нескольких образцов наблюдался мощный кумулятивный выброс газов и пламени через разрыв оболочки в сторону, кроме того, воспламенение иногда начиналось практически одновременно с плавлением металла.

Фактически исследование кумуляции тепла проявило определённый недостаток кабеля с декларируемыми улучшенными пожарно-техническими характеристиками.

\*\*\*

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Видеозаписи и термофильмы представленных экспериментов, также ряда других испытаний при сечении медных жил от 0,5 до 4 мм<sup>2</sup> и алюминиевых

от 1,5 до 6 мм<sup>2</sup> позволили выполнить хронометраж процессов кумуляции тепла и формализовать описание более 300 тестов в виде двух алгоритмов. Блок-схемы для них показаны на рис. 8, 9. Они совпадают в том, что начинаются с перегрузки, которая незамедлительно приводит к нагреву проводников или соединений. Затем резистивный нагрев вызывает повреждение изоляции. Если нагретая повреждённая часть не касается проводника или детали, имеющих другой потенциал, процесс продолжается по первому алгоритму (рис. 8). Иначе возможно вторичное замыкание (в жгуте, при кольцевой укладке или ином варианте), и возникает дополнительный этап, который показан отдельным блоком на рис. 9.

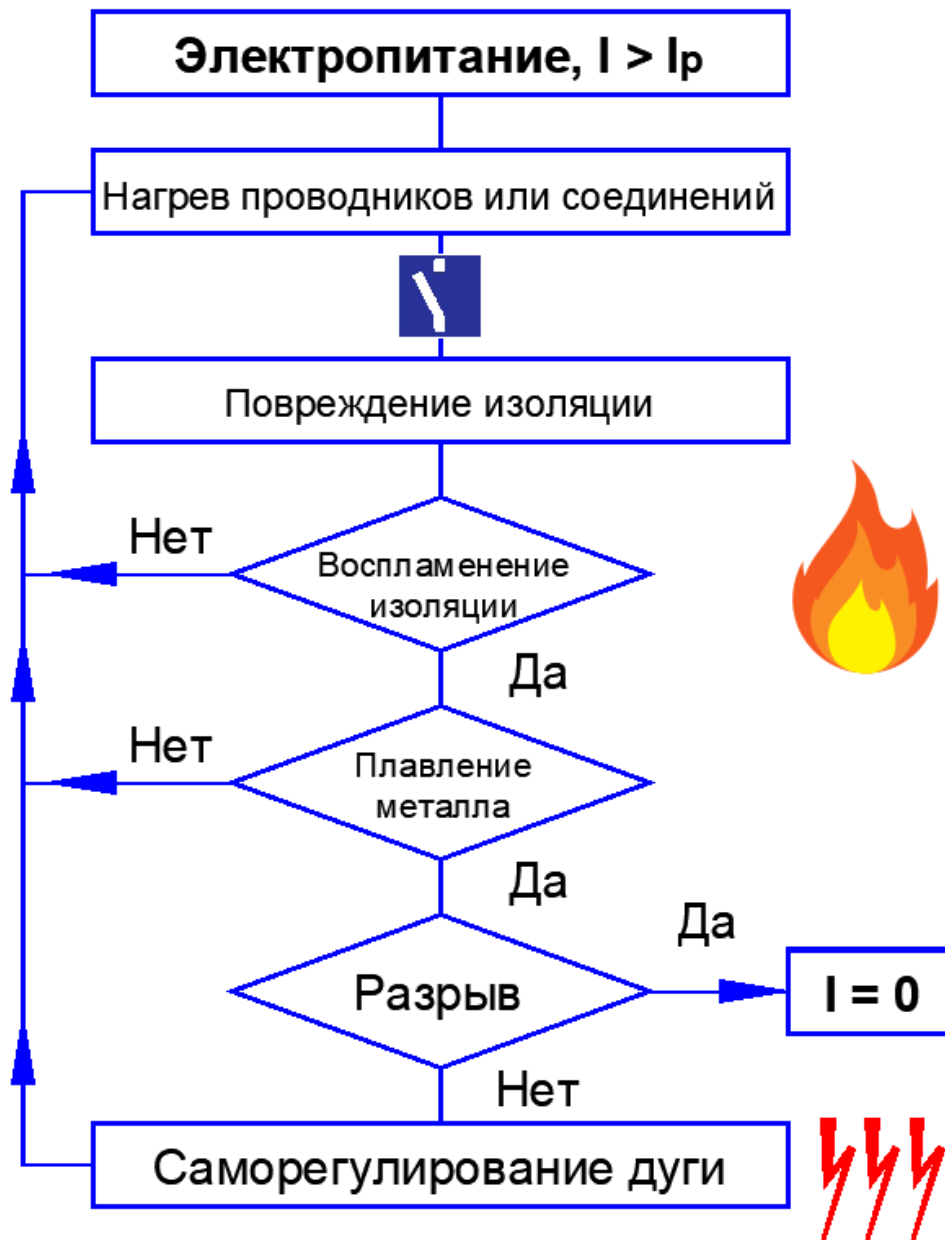


Рис. 8. Блок-схема алгоритма кумуляции тепла, повреждения и воспламенения изоляции проводников с плавлением и разрывом проводников

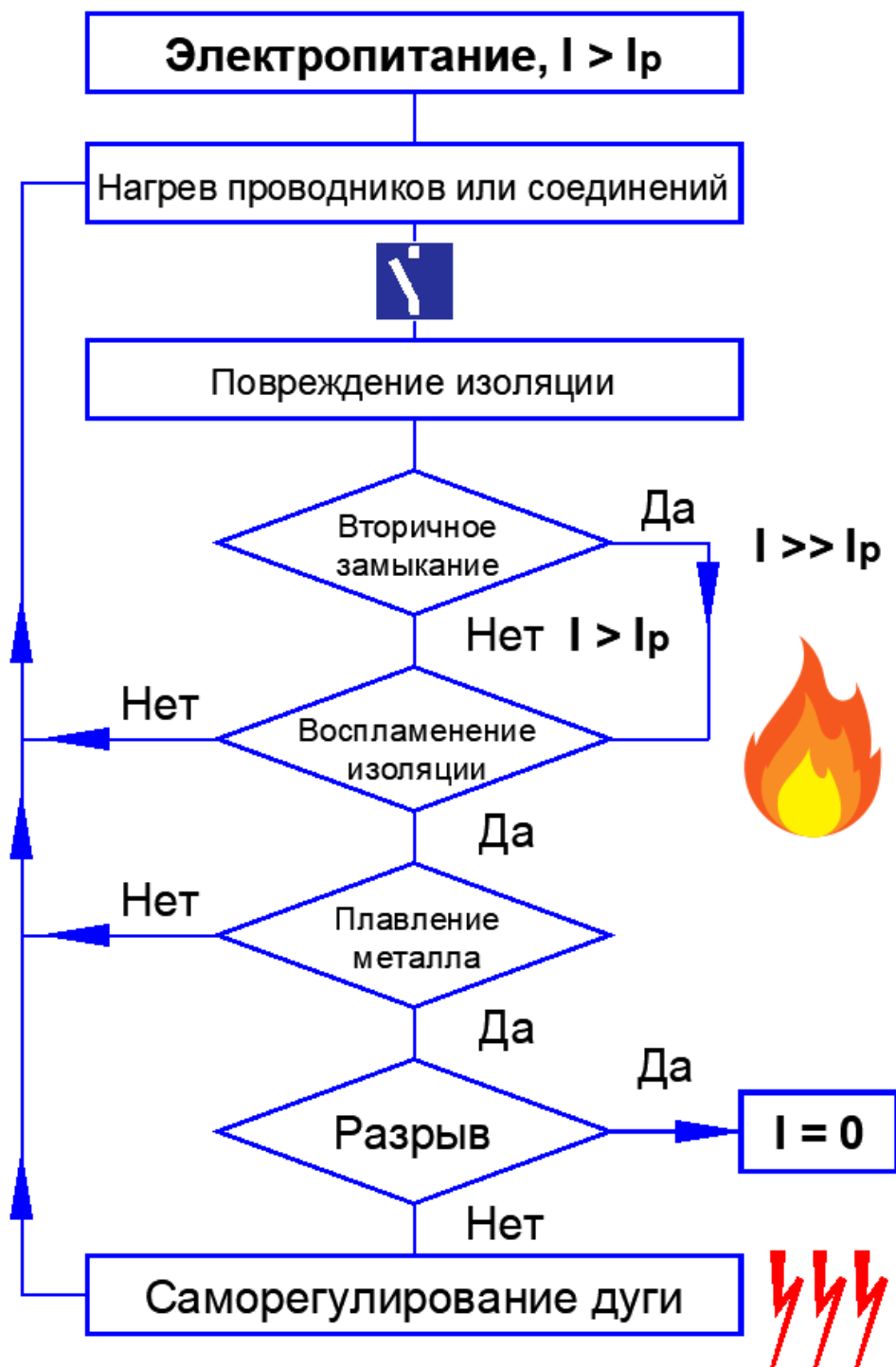


Рис. 9. Блок-схема алгоритма кумуляции тепла с вторичным замыканием

Вторичное замыкание может приводить к существенному увеличению тока перегрузки ( $I > I_p$ ), ускоряет процесс, но не меняет дальнейшую последовательность этапов. По первому и второму алгоритму воспламенение изоляции возникает, когда кратность тока перегрузки находится в определённых пределах. Заметим, что блок воспламенения показан на рисунках перед блоком плавления, поскольку температуры по табл. 2 меньше температур плавления металлов и воспламенение при постепенной кумуляции действительно опережает плавление либо возникает без плавления. В некоторых случаях плавление на доли секунды

возникает раньше, но отражение этого в блок-схемах не имеет практического смысла. Также при высокой кратности токов перегрузки воспламенение видно только на стоп-кадрах видеозаписи, однако такое горение из-за самозатухания практически мгновенно прекращается. Исключением является повреждение неизолированных проводников или частей соединений, для них блок воспламенения изоляции просто не учитывается. Оба алгоритма завершаются плавлением и разрывом проводника, после которого в отдельных экспериментах наблюдалось саморегулирование дуги (несколько вторичных замыканий). После них процесс



возвращался к нагреву, быстро проходил все этапы и в итоге цепь разрывалась окончательно ( $I=0$ ).

Формализация описания процесса повреждения дефектных соединений (рис. 10) идентична изложенному. В этом случае достаточно иметь ввиду только то, что допустимый

длительный ток соединений может оказаться намного меньше допустимого длительного тока самих проводников. И на практике процесс повреждения до пожара иногда длится годами.

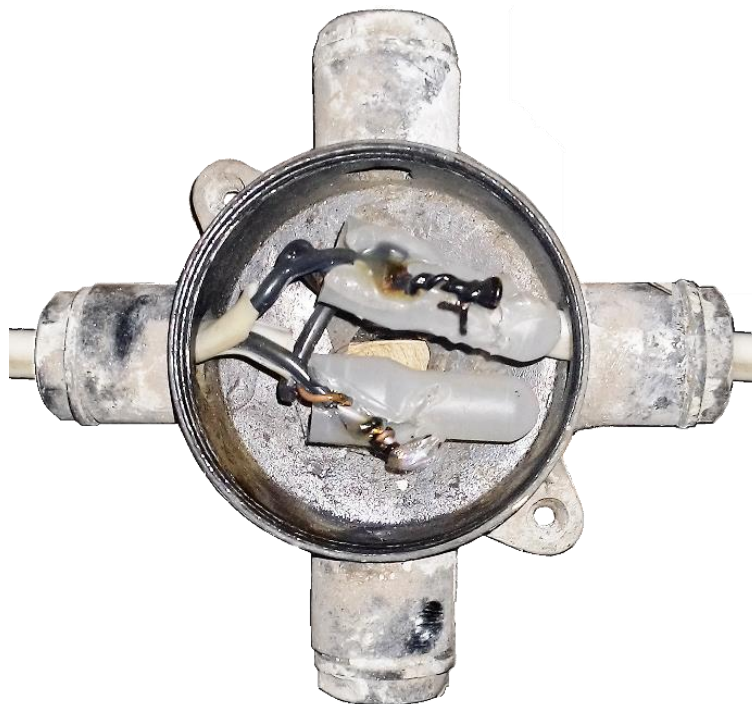


Рис. 10. Дефектное соединение медных и алюминиевых проводников.

Аналогично алгоритмы адекватно отражают процессы повреждения из-за внутренних дефектов электроприборов, например, из-за межвитковых замыканий трансформаторов.

Дополнительно следует сказать, что во всех случаях замыканий токи стремятся к току короткого замыкания, но не достигают его, поскольку реальное сопротивление цепи остаётся больше сопротивления петли фаза-ноль или петли фаза-фаза в холодном состоянии. Это замедляет процесс, но также не меняет последовательность этапов.

\*\*\*

### ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [9] подробный разбор статистических данных показал, что массовое применение выключателей дуги не обеспечило снижения количества пожаров в жилом секторе США, также то, что в результате расследования этих пожаров в большинстве случаев обнаруживаются следы действия дуги (73% и 63% от числа пожаров из-за электрооборудования соответственно). Теперь такую статистику можно объяснить с помощью результатов экспериментов, поскольку выявленные алгоритмы исключают возможность предотвращения пожара путём контроля дугового пробоя.

Применяемые детекторы дуги в комбинированных и отдельных устройствах защиты обязаны реагировать только на

саморегулируемый пробой, который возникает на последней стадии процессов (рис. 8, 9). Иначе (при реагировании на первичные замыкания-размыкания) возникнут постоянные ложные срабатывания от действия любого исправного выключателя, контактора, коллектора, стартера и т.д.

Никакие улучшения конструкции и логики выключателей дуги не позволят преодолеть указанный недостаток. Реализация контроля помех (шумов, искажений) в начале цепей не обеспечит безопасность по объективным причинам.

Необходим иной принцип действия, иная технология. Причём несколько простых решений для этого давно и хорошо известны. В том числе к таким решениям относится контроль целостности цепей с помощью дифференциальных диполей, бидиполей, блоков и денонсаторов [4].

Ещё более важно заметить то, что нагрев всегда возникает на самой первой стадии аварийного режима, и это обуславливает эффективность контроля неэлектрических показателей: температуры, состава воздуха, дымообразования, давления и т.д.

\*\*\*

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение представленных экспериментальных данных приводит к нескольким практическим рекомендациям. Так, понятно, что контроль показателей работы электроустановки должен обеспечивать

отключение на самой ранней стадии аварийного режима. В связи с этим на блок-схемах (рис. 8, 9) сразу после блока нагрева условно показан выключатель, он необходим для своевременного разрыва цепи питания.

К сожалению, применяемые устройства защиты далеко не всегда могут справиться с задачей

предотвращения необратимых повреждений и пожара. И в табл. 3 показано, что эффективность защиты зависит от выбора контролируемых показателей. Эта таблица составлена в порядке повышения рейтинга средств защиты от нижних строк к верхним.

Таблица 3

### Эффективность контроля показателей работы электроустановки

Контроль	Результат	Средства
Контроль неэлектрических показателей	Своевременное отключение	Средства пожарной автоматики + УДТ
Сравнение электрических показателей в начале и в конце цепей	Своевременное отключение кроме воспламенения горючих материалов от исправных электроприборов	Дифференциальные диполи, блоки, денонсаторы
Контроль замыкания на землю	Своевременное отключение при замыкании на землю	УДТ (ВДТ, АВДТ)
Контроль тока и напряжения в начале цепи	Необратимые повреждения электроприёмников и мест дефектных соединений	Предохранители Автоматические выключатели Реле напряжения
Контроль дугового пробоя в начале цепи	Необратимые повреждения проводников, соединений и изоляции	Выключатели дуги (AFCI, AFDD, УЗДП)

Как установлено, контроль дугового пробоя в начале цепи, может обеспечить отключение электропитания, но раньше такого отключения возникнут необратимые повреждения проводников, соединений и изоляции. Это случается в любой части электроустановки (рис. 1). Соответственно выключатели дуги поставленную задачу не решают, имеют самую низкую эффективность, и поэтому защита от дугового пробоя показана в нижней строке табл. 3.

Отметим, что решение о применении выключателей дуги на государственном уровне стало результатом грубой ошибки инженеров, которые выполнили некоторые электротехнические тесты, но не провели адекватные пожарно-технические исследования и испытания. В связи с этим требование об обязательном применении выключателей дуги уже привело к крупнейшему в истории электротехники нецелевому использованию средств. И суть не в том, что кто-то выпускает некачественные устройства. Этапы процесса кумуляции тепла, замыкания и разрыва проводников имеют определённую последовательность. Причины позже следствия не бывает, поэтому исправить ситуацию не помогут никакие усовершенствования выключателей дуги.

Традиционный и самый распространённый контроль тока и напряжения (вторая строка снизу табл. 3) допускает повреждение дефектных

соединений. Поэтому применение автоматических выключателей и реле напряжения не может полностью исключить пожар электрошита, кабеля и розеток. Риски для шнуров и электроприёмников оказываются ещё выше. Кумуляция тепла здесь может сопровождаться локализацией нагрева, например, в неразборных вилках, что также приводит к необратимым повреждениям.

В сравнении с этим существенно более эффективную защиту обеспечивает контроль замыкания на землю (третья строка снизу табл. 3). Но, если такого замыкания нет, то высокая чувствительность устройств дифференциального тока (УДТ, ВДТ, АВДТ) никак не используется. И пожарная опасность сохраняется для всех частей.

Указанный недостаток частично удаётся исключить путём сравнения электрических показателей в начале и в конце цепи. Это достигается, например, путём модификации схем контроля с помощью устройств дифференциального тока [4]. И, как уже сказано, своевременно отключить электропитание способны дифференциальные диполи, блоки и денонсаторы. Они не допустят необратимых повреждений при увеличении переходных сопротивлений, обрыве проводников или замыкании даже внутри электроприёмника. Единственный вариант пожара, который не учитывается связан с воспламенением горючих материалов от нагретых поверхностей исправных



электроприборов (рис. 1д). Горение масла на электроплите или шторы на калорифере в принципе невозможно обнаружить путём контроля электрических показателей, поскольку они не меняются. Поэтому полноценное решение задачи обеспечения пожарной безопасности заключается в добавлении контроля неэлектрических показателей: температуры проводников, соединений, изоляции и корпусов, температуры и состава воздуха, также продуктов деструкции изоляции и (или) термоиндикаторных красок. Ещё раз повторим указанное решение и покажем в верхней строке рейтинга (табл. 3). Причём обратим внимание на то, что для обеспечения электробезопасности и противоаварийной защиты способы контроля электрических и неэлектрических показателей следует применять совместно.

\*\*\*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников В.С. Пожарная автоматика защитного отключения электроустановок. Монография – М.: Мир науки, 2019 – URL: <http://izd-mn.com/PDF/08MNNPM19.pdf>
2. Мельников В.С. Пожарная безопасность электроустановок, алгоритм зажигания / Международный научно-исследовательский журнал, 2023, №1 (127) — URL: <https://research-journal.org/media/articles/3550.pdf>
3. Мельников В.С. Пожарная безопасность электроустановок, универсальное решение и итоги применения защиты от дуги / Международный научно-исследовательский журнал, 2023, №4 (130) – URL: <https://research-journal.org/archive/4-130-2023-april/10.23670/IRJ.2023.130.45>
4. Мельников В.С. Универсальная защита электроустановок от аварий и пожаров / Евразийский Союз Учёных. Серия: технические и физико-математические науки. Ежемесячный научный журнал, 2023 т.1 №3(106) с.16-29 – URL: <https://fizmat-tech.euroasia-science.ru/index.php/Euroasia/issue/view/139/159>
5. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году. Статистика пожаров и их последствий. Информационно-аналитический сборник. ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023, 80 с (с изм. на 31.07.2023) – URL: <https://www.vniipo.ru/institut/informatsionnye-sistemy-reestry-bazy-i-banki-danny/federalnyy-bank-dannykh-pozhary/>
6. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник. М.: Асс. «Пожнаука», 2004, Ч. 1 – 713 с., Ч. 2 – 774 с.
7. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок, М.: ООО «КАБЕЛЬ», 2009, 328 с.
8. Мельников В.С. Натурное моделирование пожара электроцита / Международный журнал гуманитарных и естественных наук 2023, № 10-2 (85) с.65-82) – URL: <http://intjournal.ru/wp-content/uploads/2023/11/Mezhdunarodnyj-ZHurnal-10-2.pdf>
9. Мельников В.С. Статистика пожаров и безопасность электроустановок / Евразийский Союз Учёных. Серия: технические и физико-математические науки Ежемесячный научный журнал 2023, №9(112), т.1, с.27-37 – URL: <https://fizmat-tech.euroasia-science.ru/index.php/Euroasia/issue/view/146/167>

УДК 699.841

---

## КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОПОРЫ, КАК СРЕДСТВО ОПТИМАЛЬНОЙ СЕЙСМОЗАЩИТЫ, ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

---

*Кулебякин А.В., Весова Л.М.*

*Волгоградский государственный технический университет*

### АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются преимущества и недостатки использования монолитных железобетонных конструкций в качестве основных, в процессе проведения строительно-монтажных работ, а также предлагается к рассмотрению сравнение монолитного и сборного домостроения, с целью повышения эффективности и снижение стоимости строительства зданий и сооружений.

В ходе работы анализируются современные технологии и материалы, используемые в монолитном строительстве, а также проводится сравнительный анализ с традиционным методом строительства аналогичного здания из сборных конструкций.

**Ключевые слова:** Организационно-технологические решения, технология строительства, бригады, комплексное производство работ, монолитный железобетон, строительный цикл

Появление на строительном рынке иностранных компаний, предлагающих строительство уникальных объектов «под ключ», значительно изменило традиционное восприятие монолитного строительства. За короткий период времени были наглядно продемонстрированы широкие возможности монолитного железобетона в решении всего спектра задач, связанных со

строительством зданий различного назначения. Особое внимание зарубежными строительными компаниями уделялось использованию эффективных опалубочных систем в жилищном строительстве. Именно правильный выбор опалубки позволил обеспечить высокое качество работ и сократить сроки строительства.

Опыт монолитного строительства, накопленный российскими строителями к концу 1990-х, позволил освоить перспективную технологию, подтвердив ее эффективность. Помимо потенциала повышения архитектурной выразительности типового массового строительства, монолитное строительство продемонстрировало ряд технико-экономических преимуществ, включая сокращение расхода металла, общей трудоемкости и суммарных затрат по сравнению с кирпичным, крупноблочным и даже панельным строительством. [4,5].

Все эти факторы способствуют массовому распространению монолитного домостроения в городах, особенно в сейсмоопасных районах страны и в местах, где не развита инфраструктура сборного железобетона. На сегодняшний день ассортимент объектов, возводящихся с

использованием монолитного подхода, значительно вырос.

Анализ открытых источников [34,35] показывает, что успешное выполнение работ и соблюдение сроков во многом зависит от правильного выбора и квалификации рабочих команд, обеспечивающих непрерывный рабочий процесс. Такой подход позволяет обеспечить ритмичность работы и высокую производительность.

Для выполнения монолитных железобетонных работ предлагается на объектах иметь следующие специализированные звенья (бригады), на основе рассмотренного исследования [34] и проведенного детального анализа результатов этой работы. В таблице 2 указан перечень состава бригад, унифицированный под объекты для жилого строительства, с простой формой здания.

Таблица 1.

**Универсальный состав рабочих бригад, для проведения строительства зданий из монолитного железобетона**

Профессия	Операция	Число рабочих
Опалубщики вертикальных конструкций	Сборка карт, смазка, установка, фиксация и выверка опалубки, снятие опалубки, очистка и ремонт	1
Опалубщики горизонтальных конструкций	Монтаж, выверка с геодезистами, демонтаж	1
Плотники	Установка проемообразовывателей в стены, закрытие торцов опалубки, установка отсечек и индивидуальной опалубки и доборов.	см. рис. 8
Арматурщики вертикальных конструкций	Армирование вертикальных конструкций, вязка узлов, установка фиксаторов, для защитного слоя	4
Арматурщики горизонтальных конструкций	Установка балок и ригелей, увязка стержней, фиксаторов, установка отсечек	4
Заготовщики арматуры	Резка, загибка, вязка арматуры, подготовка хомутов, заготовка отсечек и элементов фиксации	3
Бетонщики	Укладка бетона, уплотнение вибраторами, устройство паро-теплоизоляции	4
Отделочники	Устранение дефектов, грязи, очистка закладных элементов, шпаклевка, шлифовка поверхностей.	4
Разнорабочие	Прочие работы	4

В то время как специалисты по установке арматуры занимаются установкой готовых каркасов вертикального направления, специалисты по опалубке удаляют одну сторону опалубки затвердевших конструкций, чистят, смазывают её и устанавливают в новом месте. Рабочие по дереву в это время устанавливают проёмы, таким образом подготавливая рабочую зону для специалистов по арматуре и опалубке вертикального направления.

Когда команда плотников стелет фанеру, команда опалубщиков горизонтальных конструкций снимает опалубку с забетонированного участка, устанавливает опоры для перекрытия и перемещает опалубку на новый участок.

Численно-квалификационный состав предложенного состава указан на фрагменте календарного плана, разработанного под стандартный жилой многоквартирный 24-х этажный дом, с учетом идеальных условий. В качестве города проведения строительства взят г. Волгоград. Необходимо учитывать, что количество рабочих в специализированных звеньях напрямую зависит от объема выполняемых работ, однако в аналогичных типовых проектах возможен переход на численный коэффициент количества состава рабочих. В рамках проведенной работы, скорость возведения одного этажа составила 2 календарных дня.



# Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал  
№ 11 (114)/2023 Том 1

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Макаровский Денис Анатольевич**

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

**Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

**Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

**Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

**Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович  
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:  
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А  
E-mail: [info@euroasia-science.ru](mailto:info@euroasia-science.ru) ;  
[www.euroasia-science.ru](http://www.euroasia-science.ru)

Учредитель и издатель ООО «Логика+»  
Тираж 1000 экз.