

ІЗАСНОВНИКИ

Київський національний університет  
будівництва і архітектури (Україна)

Університет науки і техніки Цзянсу  
(Китай)

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 24366-14206Р від 13.02.2020 р.

ISSN 2415-8550 (print) ISSN 2415-8569 (online)

DOI: 10.32347/uwt2021.11

Виходить щорічно

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

# ПІДВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОМИСЛОВА ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

Заснований у серпні 2015 року

*Вип 11 (2021)*

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

**Михайло Сукач** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

ЗАСТУПНИК РЕДАКТОРА

**Сергій Максимов** д.т.н., ст.н.с., Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

**Олександр Безверхий** д.ф.-м.н., проф., Національний транспортний університет, Київ

**Ігор Бойко** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

**Володимир Блінцов** д.т.н., проф., НУК ім. акад. Макарова, Миколаїв

**Наталія Бушуєва** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

**Віктор Грінченко** академік НАНУ, д.т.н., проф. Ін-т гідромеханіки НАН України, Київ

**Леонід Дворкін** д.т.н., проф., НУВГП, Рівне

**Микола Дьомін** чл.-кор. НАМУ, д.арх., проф., КНУБА, Київ

**Степан Епоян** д.т.н., проф., ХНУБА, Харків

**Леонід Заміховський** д.т.н., проф., ІФНТУНГ, Івано-Франківськ

**Станіслав Зуб** д.ф.-м.н., проф., ХНПУ ім. Г. Сковороди, Харків

**Сергій Клименко** д.т.н., проф. Ін-т надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

**Павло Кривенко** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

**Тетяна Кривомаз** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

**Веніамін Кубенко** академік НАНУ, д.ф.-м.н., проф., Ін-т механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ

**Олег Лимарченко** д.т.н., проф., КНУ ім. Тараса Шевченка, Київ

**Олександр Луговський** д.т.н., проф., НТУ України КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ

**Леонід Мазуренко** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

**Олександр Маслов** д.т.н., проф., КрНУ ім. М. Остроградського, Кременчук

**Іван Назаренко** д.т.н., проф., президент Академії будівництва України, Київ

**Алла Плешкановська** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

**Костянтин Почка** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

**Ігор Ребезнюк** д.т.н., проф., НЛТУ України, Львів

**Олександр Терентьєв** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

**Віктор Тімохін** д.арх., проф., КНУБА, Київ

**Валерій Товбич** д.арх., проф., КНУБА, Київ

**Валентин Томашевський** д.т.н., проф., НТУ України КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ

**Денис Чернишев** д.т.н., проф., КНУБА, Київ

**Надія Шебек** д.арх., проф., КНУБА, Київ

## ВПЛИВ ВОДИ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Природничі науки  
Математика та статистика  
Інформаційні технології  
Механічна та електрична інженерія  
Автоматизація та приладобудування  
Виробництво та технології  
Архітектура та будівництво

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

**Winfried Auzinger** PhD eng., Ass.Prof., Vienna University of Technology (Austria)

**Vladislav Bogdanov** PhD phys. and math., Snr.Res.Ass., Progressive Research Solutions Pty, Sidney (Australia)

**Goran Bryntse** PhD, Ass.Prof., SERO, European Renewable Energy Federation, Borlange (Sweden)

**Carsten Drebenstedt** Dr. hab, Prof., Technical University Bergakademie, Freiberg (Germany)

**Marian Druza** PhD eng., Prof. University of Zilina (Slovakia)

**Miklos Hajdu** PhD eng., Prof., Budapest University of Technology and Economics (Hungary)

**Viktor Mashkov** Dr.Tech.Sc., Prof., University J. Evangelista Purkyne in Usti-nad-Labem (Czech Republic)

**Miroslaw Skibniewski** PhD eng., Prof., University of Maryland, College Park (USA)

**Henryk Sobczuk** Dr. hab, Prof., Politechnika Lubelska, Lublin (Poland)

**Jiayou Wang** PhD, Prof., Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang (China)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України

Затверджено вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури  
27 вересня 2021 р., протокол № 44

Мови видання українська, російська, англійська

Зміст

**Математика та статистика**

<b>Vladislav Bogdanov</b> .....	3
One approach to the problems of impact of fine shells of the S.P. Timoshenko type on elastic half-space	
Один подход к задачам удара оболочек типа С.П. Тимошенко об упругое полупространство	

**Інформаційні технології**

<b>Walery Wysoczański, Sławian Radev</b> .....	19
Cybernetyczno-ekonomiczne modele matematyczne autarkii energetycznej w kontekście zadań ekologii integralnej	
Cybernetic and economic mathematical models of energy autarky in the context of integral ecology tasks	

**Механічна та електрична інженерія**

<b>Михаил Сукач</b> .....	31
Условия функционирования и оценка донного фона глубоководных аппаратов	
Operating conditions and assessment of the bottom background of deep-sea vehicles	
<b>Владимир Лебедев</b> .....	46
Решение проблем подводной механизированной и автоматической дуговой сварки различных металлоконструкций мокрым способом	
Solving the problems of underwater mechanized and automatic arc welding of various metal structures with a wet method	

**Автоматизація та приладобудування**

<b>Andrei Tevyashev, Olga Matviyenko, Glib Nikitenko</b> .....	56
Stochastic Model and Method of Optimization of Operation Modes of a Group of Artesian Wells in Water Supply Systems	
Стохастическая модель и метод оптимизации режимов работы группы артезианских скважин в системах водоснабжения	
<b>Leonid Zamikhovskiy, Olena Zamikhovska, Mykola Nykolaychuk, Ivan Levitskiy</b> .....	67
Trends in the development of systems for monitoring the state of water bodies and the development of a Geo-information system-Dniester on the basis of an industrial IoT	
Тенденции развития систем мониторинга состояния водных объектов и разработка ГИС-Днепр на базе промышленного ИВТ	

**Виробництво та технології**

<b>Petro Kulikov, Yulia Makarenko, Victor Khoruzhiy, Valeriy Makarenko</b> .....	78
Investigation of mechanical properties and crack resistance parameters of steel reinforcements of reinforced concrete structures of long-term special term	
Исследование механических свойств и параметров трещиностойкости стальных укреплений железобетонных конструкций долгосрочного специального срока	
<b>Mykhailo Sukach, Myroslav Kindrachuk, Valeriy Makarenko</b> .....	88
Research of corrosion and mechanical resistance of reinforcement steels designated for operation in hydraulic structures	
Исследование коррозии и механической устойчивости арматурных сталей, предназначенных для эксплуатации в гидравлических сооружениях	

<b>Вказівки для авторів</b> .....	96
-----------------------------------	----

## One approach to the problems of impact of fine shells of the S.P. Timoshenko type on elastic half-space

Vladislav Bogdanov

Progressive Research Solutions Pty. Ltd.  
28/2 Buller Rd, Artarmon, Sydney, Australia 2064  
vladislav\_bogdanov@hotmail.com, orcid.org/0000-0002-3424-1801

Received 06.02.2021, accepted after revision 06.07.2021  
<https://doi.org/10.32347/uwt2021.11.1101>

**Abstract.** Shell elements are used in many thin-walled structures. Therefore, to study the dynamics of propagation of wave processes in the fine shells of S.P. Timoshenko type is an important aspect as well as it is important to investigate a wave processes of the impact, shock in elastic foundation in which a striker is penetrating. Refined model of S.P. Timoshenko makes it possible to consider the shear and the inertia rotation of the transverse section of the shell. Disturbances spread in the shells of S.P. Timoshenko type with finite speed. The method of the outcoming dynamics problems to solve an infinite system of integral equations Volterra of the second kind and the convergence of this solution are well studied. Such approach has been successfully used for cases of the investigation of problems of the impact a hard bodies and an elastic fine shells of the Kirchhoff–Love type on elastic a half-space and a layer. In this paper an attempt is made to solve the plane and the axisymmetric problems of the impact of an elastic fine cylindrical and spheric shells of the S.P. Timoshenko type on an elastic half-space using the method of the outcoming dynamics problems to solve an infinite system of integral equations Volterra of the second kind. The discretization using the Gregory methods for numerical integration and Adams for solving the Cauchy problem of the reduced infinite system of Volterra equations of the second kind results in a poorly defined system of linear algebraic equations: as the size of reduction increases the determinant of such a system to aim at infinity. This technique does not allow to solve plane and axisymmetric problems of dynamics for fine shells of the S.P. Timoshenko type and elastic bodies. It is shown that this approach is not acceptable for investigated in this paper the plane and the axisymmetric problems.



**Vladislav Bogdanov**  
Director  
PhD phys. and math.  
Snr. Res. Ass.

This shows the limitations of this approach and leads to the feasibility of developing other mathematical approaches and models. It should be noted that to calibrate the computational process of deformation in the elastoplastic formulation at the elastic stage, it is convenient and expedient to use the technique of the outcoming dynamics problems to solve an infinite system of integral equations Volterra of the second kind.

**Keywords:** impact, elastic, elastic-plastic, half-space, axisymmetric problem, fine, spherical shell, S.P. Timoshenko.

### INTRODUCTION

The approach [2 – 6] for solving problems of dynamics, developed in [7 – 9, 11], makes it possible to determine the stress-strain state of elastic half-space and a layer during penetration of absolutely rigid bodies [2, 3, 8, 9, 11] and the stress-strain state of elastic Kirchhoff–Love type fine shells and elastic half-spaces and layers at their collision [4 – 7]. This led to the feasibility of developing other mathematical approaches and models. In [10, 12 – 15], a new approach to solving the problems of impact and nonstationary interaction in the elastoplastic mathematical

formulation [16 – 20] was developed. In non-stationary problems, the action of the striker is replaced by a distributed load in the contact area, which changes according to a linear law [21 – 23]. The contact area remains constant. The developed elastoplastic formulation makes it possible to solve impact problems when the dynamic change in the boundary of the contact area is considered and based on this the movement of the striker as a solid body with a change in the penetration speed is taken into account. Also, such an elastoplastic formulation makes it possible to consider the hardening of the material in the process of nonstationary and impact interaction.

The solution of problems for elastic shells [24 – 27], elastic half-space [28 – 30], elastic layer [31], elastic rod [32, 33] were developed using method of the influence functions [34]. In [24] the process of non-stationary interaction of an elastic cylindrical shell with an elastic half-space at the so-called "supersonic" stage of interaction is studied. It is characterized by an excess of the expansion rate areas of contact interaction speed of propagation tension-compression waves in elastic half-space. The solution was developed using influence functions corresponding concentrated force or kinematic actions for an elastic isotropic half-space which were found and investigated in [34].

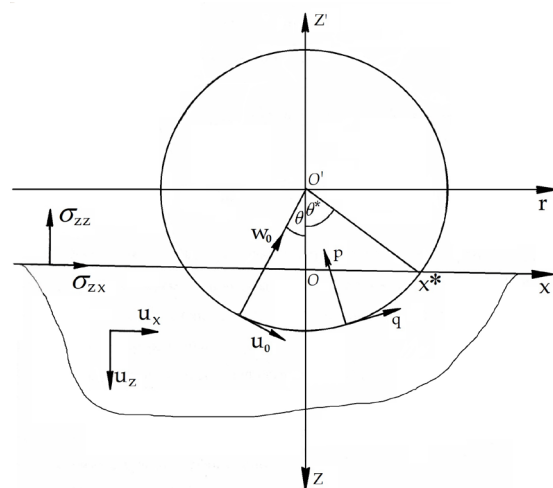
In this paper, we investigate the approach [4 – 7] for solving the axisymmetric problem of the impact of a spherical fine shell of the S.P. Timoshenko type on an elastic half-space.

It is shown that the approach [2 – 5], after the reduction of the infinite system of Volterra integral equations of the second kind [6 – 8, 11] and discretization using the Gregory methods for numerical integration and Adams for solving the Cauchy problem, a poorly defined system of linear algebraic equations is obtained for which the determinant of the matrix of coefficients increases indefinitely with increasing size of reduction.

#### PROBLEM FORMULATION

A thin elastic cylindrical shell comes into collision with the elastic half-space  $z \geq 0$  with

its lateral surface along the generatrix of the cylinder at the moment of time  $t=0$ . We associate with the shell, as can be seen in Figure 1, a movable cylindrical coordinate system  $r\theta z'$ :  $\theta$  – the polar angle, which is plotted from the positive direction of the  $oz$  axis, the  $oy$  axis coincides with the cylinder axis. Let us denote by  $u_0(t, \theta)$ ,  $w_0(t, \theta)$ ,  $p(t, \theta)$ ,  $q(t, \theta)$  the tangential and normal displacements of the points of the middle surface of the shell and the radial and tangential components of the distributed external load, which acts on the shell. We associate a fixed Cartesian coordinate system  $xyz$  with the half-space, so that the  $Oz$  axis is directed deep into the medium, the  $Ox$  axis is directed along the surface of the half-space, and the  $Oy$  axis is parallel to the generatrix of the cylinder. The shell thickness  $h$  is much less than the radius  $R$  of the middle surface of the shell ( $h/R \leq 0,05$ ).



**Fig. 1.** Scheme of the system cylindrical shell – half space

In case of axisymmetric problem, a thin elastic spherical shell, moving perpendicular to the surface of the elastic half-space  $z \geq 0$ , reaches this surface at time  $t=0$ . We associate with the shell, as shown in Fig. 2, a movable spherical coordinate system  $r'\varphi'\theta'$ , where  $\varphi'$  – is the longitude of the radius vector  $r$ ,  $\theta'$  – is the polar angle.

With the half-space we associate a fixed cylindrical coordinate system  $r\varphi z$ , the  $Oz$  axis is directed deep into the medium,  $\varphi$  – is the

polar angle. Angle  $\theta$  is plotted from the positive direction of the  $Oz$  axis.

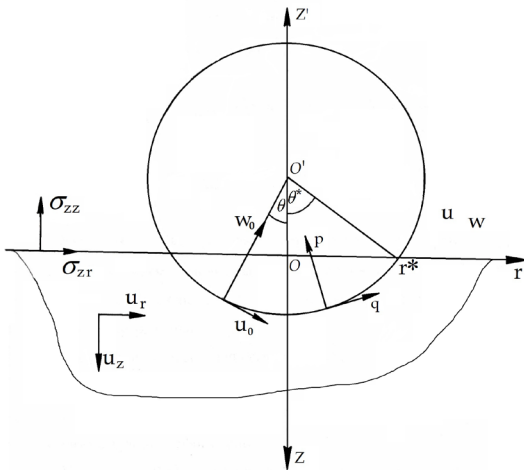


Fig. 2. Scheme of the system spherical shell – half space

The cylindric or spheric shell penetrates into the elastic medium at a speed  $v_T(t)$ , ( $0 \leq t \leq T$ ), the initial penetration rate is  $V_0 = v_T(0)$ ,  $T$  – the time during which the shell interacts with the half-space. The shell thickness  $h$  is much less than the radius  $R$  of the middle surface of the shell ( $h/R \leq 0,05$ ).

Let us denote by  $u_0(t, \theta)$ ,  $w_0(t, \theta)$ ,  $p(t, \theta)$ ,  $q(t, \theta)$  the tangential and normal displacements of the points of the middle surface of the shell and the radial and tangential components of the distributed external load, which acts on the shell. With the half-space we associate a fixed cylindrical coordinate system  $r\varphi z$ , the  $Oz$  axis is directed deep into the medium,  $\varphi$  – is the polar angle. Angle  $\theta$  is plotted from the positive direction of the  $Oz$  axis. The physical properties of the half-space material are characterized by elastic constants: volumetric expansion module  $K$ , shear modulus  $\mu$  and density  $\rho$ . An elastic medium with constants  $K$ ,  $\mu$ ,  $\rho$  will be associated with a hypothetical acoustic medium with the same constants  $K$ ,  $\rho$ , wherein  $\mu = 0$ . Under  $C_p$ ,  $C_s$ ,  $C_0$  we mean the speed of longitudinal and transverse waves in an elastic half-space and the speed of sound in the considered hypothetical acoustic medium.

Let's introduce dimensionless variables:

$$\begin{aligned}
 t' &= \frac{C_0 t}{R}, \quad \left\| \frac{x'}{r'} \right\| = \frac{1}{R} \left\| \frac{x}{r} \right\|, \quad z' = \frac{z}{R}, \quad u'_i = \frac{u_i}{R}, \\
 u'_0 &= \frac{u_0}{R}, \quad w'_0 = \frac{w_0}{R}, \quad \sigma'_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{K}, \quad v'_T = \frac{v_T}{C_0}, \quad (1) \\
 w'_T &= \frac{w_T}{R}, \quad p' = \frac{p}{KR} \left\| \frac{1}{1/R} \right\|, \quad q' = \frac{q}{KR} \left\| \frac{1}{1/R} \right\|, \\
 M' &= \frac{M}{\rho R^2} \left\| \frac{1}{1/R} \right\| \cdot \left( i, j = \left\| \frac{x}{r} \right\|, \left\| \frac{y}{\varphi} \right\|, z \right) \\
 \beta^2 &= \frac{C_S^2}{C_0^2} = \frac{\mu}{K}, \quad \alpha^2 = \frac{C_p^2}{C_0^2} = \left( 1 + \frac{4\mu}{3K} \right), \\
 C_0^2 &= \frac{K}{\rho}, \quad b^2 = \frac{\beta^2}{\alpha^2} = \frac{3\mu}{3K + 4\mu}.
 \end{aligned}$$

here  $\mathbf{u} = \left( u_{\left\| \frac{x}{r} \right\|}, u_{\left\| \frac{y}{\varphi} \right\|}, u_z \right)$  – is the vector of movement of points of the environment;  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{\left\| \frac{xz}{rz} \right\|}$  – nonzero components of the stress tensor of the medium;  $M$  – is the shell running mass;  $v_T(t)$ ,  $w_T(t)$  – speed and movement of the shell as a solid. In what follows, we will use only dimensionless quantities, so we omit the dash. The elastic half-space and the spheric shell are in a state of axisymmetric deformation.

Differential equations (of the S.P. Timoshenko type) describing the dynamics of cylindrical (2) and spherical (3) shells and considering the shear and inertia of rotation of the transverse section, due to (1), take the following form [35, pp. 297, 307]:

$$\begin{aligned}
 \gamma_0^2 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 u_0}{\partial \theta^2} + (1 + a_4) \frac{\partial w_0}{\partial \theta} + a_4 \Phi - \\
 &- a_4 u_0 + \beta_3 q, \\
 \eta_0^2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 w_0}{\partial \theta^2} + \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - (1 + a_3) \frac{\partial u_0}{\partial \theta} - \\
 &- a_3 w_0 + \beta_4 p, \\
 \gamma_0^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} - a_2 \frac{\partial w_0}{\partial \theta} - a_2 \Phi + a_2 u_0,
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{1-\nu_0^2} \frac{\partial^2 u_0}{\partial \theta^2} + \frac{\text{ctg}\theta}{1-\nu_0^2} \frac{\partial u_0}{\partial \theta} + \frac{2(1+\nu_0)k_s + 1-\nu_0}{2(1-\nu_0^2)k_s} \frac{\partial w_0}{\partial \theta} - \\ & - \frac{\nu_0 + (1-\nu_0)\cos^2\theta}{(1-\nu_0^2)\sin^2\theta} u_0 + \frac{\Phi}{2(1+\nu_0)k_s} = \gamma_0^2 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} - q, \\ & \frac{1}{2(1+\nu_0)k_s} \frac{\partial^2 w_0}{\partial \theta^2} - \frac{1}{1-\nu_0} \frac{\partial u_0}{\partial \theta} + \frac{\text{ctg}\theta}{2(1+\nu_0)k_s} \frac{\partial w_0}{\partial \theta} + \\ & + \frac{1}{2(1+\nu_0)k_s} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \frac{\text{ctg}\theta}{1-\nu_0} u_0 - \frac{2}{1-\nu_0} w_0 + \\ & + \frac{\text{ctg}\theta}{2(1+\nu_0)k_s} \Phi = \gamma_0^2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} - p, \quad (3) \\ & \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \text{ctg}\theta \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \frac{E_0 h R^2}{2(1+\nu_0)k_s D} \frac{\partial w_0}{\partial \theta} - \\ & - \frac{(1-\nu_0)k_s D(2\nu_0 + (1-\nu_0)\sin 2\theta) + E_0 h R^2 \sin^2 \theta}{2(1+\nu_0)k_s D \sin^2 \theta} \Phi = \\ & = \eta_0^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} \gamma_0^2 &= \left\| \frac{C_0^2/C_{02}^2}{\rho_0 k_1 C_0^2/E_0} \right\|, \quad \eta_0^2 = \left\| \frac{C_0^2/C_{01}^2}{\rho_0 h^3 C_0^2 k_r / 12D} \right\|, \\ C_{01}^2 &= \frac{E_0}{(1-\nu_0^2)\rho_0}, \quad C_{02}^2 = \frac{b_1^2 E_0}{2(1+\nu_0)}, \\ a_2 &= \frac{6(1-\nu_0)b_1^2 R^2}{h^2}, \quad a_3 = \frac{2}{(1-\nu_0)b_1^2}, \\ \beta_3 &= \frac{(1-\nu_0^2)K^2 R}{E_0^2 h}, \quad \beta_4 = \frac{2(1+\nu_0)K^2 R}{b_1^2 E_0^2 h}, \\ b_1^2 &= \frac{5}{6}, \quad a_4 = \frac{1}{a_3}, \quad k_1 = 1 + \frac{h^2}{12R^2}, \\ k_r &= 1 + \frac{3h^2}{20R^2}, \quad D = \frac{E_0 h^3}{12(1-\nu_0^2)}, \quad k_s = \frac{5}{6}, \end{aligned}$$

here  $\Phi$  – angle of rotation of the normal section to the middle surface,  $b_1^2$  – coefficient that considers the distribution of tangential forces in the transverse section of the cylindrical shell,  $k_s$  – shear ratio of the spherical shell,  $D$  – cylindrical stiffness,  $\nu_0, E_0, \rho_0$  – Poisson's ratio, Young's modulus and density of the shell material,  $p$  и  $q$  –

respectively, the radial and tangential components of the distributed load acting on the shell,  $R$  – is the shell radius.

The motion of an elastic medium is described by scalar potential  $\varphi$  and non-zero component of vector potential  $\psi$ , which satisfy the wave equations [2 – 5]:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= \frac{\partial^2 \varphi}{\alpha^2 \partial t^2}, \quad \Delta \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\beta^2 \partial t^2}, \\ \Delta &\equiv \left\| \begin{array}{c} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{array} \right\|. \quad (4) \end{aligned}$$

Physical quantities are expressed in terms of wave potentials as follows [6 – 9]:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad u_y = 0, \\ \sigma_{zz} &= (1-2b^2) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + 2\beta^2 \times \\ & \times \left\| \begin{array}{c} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right) \\ \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z} + \frac{\partial \psi}{r \partial z} \right) \end{array} \right\|, \\ \sigma_{xz} &= 2\beta^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - 2\beta^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}, \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{yz} = 0, \quad \sigma_{xx} = \Theta - \sigma_{zz}, \\ u_r &= \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\psi}{r}, \\ u_\varphi &= 0, \quad \sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi z} = 0, \quad (5) \\ \sigma_{rz} &= 2\beta^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - 2\beta^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}, \\ \sigma_{rr} &= (1-2b^2) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + 2\beta^2 \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z} \right), \\ \Theta &= \sigma_{zz} + \sigma_{xx} = 2(1-b^2) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}. \end{aligned}$$

If the shear modulus  $\mu$  is set equal to zero  $\mu = 0$ , then the equations of motion of the elastic medium will be the equations of acoustics.

Let us consider the initial stage of the process of impact of elastic shells on the surface of an elastic half-space [4 – 7], when no plastic deformations occur and the depth of the shell penetration into the medium is small.

The problem of interaction of elastic shells with an elastic half-space is solved in a linear formulation, therefore, we linearize the boundary conditions [2, 3, 8, 9, 11]: we transfer the boundary conditions from the perturbed surface to the undisturbed surface of the bodies that are deformed. We assume that there is no friction between the elastic half-space and the penetrating body, or the slippage condition is valid.

As can be seen from Fig. 1, the projections of the functions  $u_0$ ,  $w_0$ ,  $p$  and  $q$  on the  $\left\| \begin{matrix} o'r \\ or \end{matrix} \right\|$  and  $oz$  axes will be equal:

$$\begin{aligned} pr_z w_0(t, \theta) &= w_0(t, \theta) \cos \theta, \\ pr_z u_0(t, \theta) &= u_0(t, \theta) \sin \theta, \\ pr_z p(t, \theta) &= p(t, \theta) \cos \theta, \\ pr_z q(t, \theta) &= q(t, \theta) \sin \theta, \\ pr_r w_0(t, \theta) &= -w_0(t, \theta) \sin \theta, \\ pr_r u_0(t, \theta) &= u_0(t, \theta) \cos \theta, \\ pr_r p(t, \theta) &= -p(t, \theta) \sin \theta, \\ pr_r q(t, \theta) &= q(t, \theta) \cos \theta. \end{aligned}$$

Then, in the  $\left\| \begin{matrix} zox \\ zor \end{matrix} \right\|$  coordinate system, the displacements  $u_z$ ,  $u_{\left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\|}$  and stresses  $\sigma_{zz}$  and  $\sigma_{\left\| \begin{matrix} zx \\ rz \end{matrix} \right\|}$  at the surface points of the contact area will be written as:

$$u_z \left( t, \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\|, 0 \right) = w_T(t) - f \left( \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\| \right) - w_0(t, \theta) \cos \theta - u_0(t, \theta) \sin \theta, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} u_x(t, x, 0) &= -w_0(t, \theta) \sin \theta + u_0(t, \theta) \cos \theta, \\ u_r(t, r, 0) &= -w_0(t, \theta) \sin \theta + u_0(t, \theta) \cos \theta, \\ \sigma_{zz} \left( t, \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\|, 0 \right) &= -p(t, \theta) \cos \theta - q(t, \theta) \sin \theta, \\ \sigma_{rz}(t, r, 0) &= -p(t, \theta) \sin \theta + q(t, \theta) \cos \theta, \\ p(t, \theta) &= -\sigma_{zz} \left( t, \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\|, 0 \right) \cos \theta - \sigma_{\left\| \begin{matrix} zx \\ rz \end{matrix} \right\|} \left( t, \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\|, 0 \right) \sin \theta, |\theta| < \theta^*, \\ q(t, \theta) &= -\sigma_{zz} \left( t, \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\|, 0 \right) \sin \theta + \sigma_{\left\| \begin{matrix} zx \\ rz \end{matrix} \right\|} \left( t, \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\|, 0 \right) \cos \theta, |\theta| < \theta^*, \end{aligned}$$

where  $w_T(t)$  – displacement of the shell as a rigid body, the function  $f()$  describes the shell profile,  $2\theta^*$  as can be seen from Figures 1 and 2, the size of the shell sector in contact with the half-space. In the case of the cylindrical and the spherical shells:

$$f \left( \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\| \right) = 1 - \sqrt{1 - \frac{\|x\|^2}{r^2}}.$$

The kinematic condition that determines the half-size of the contact area  $\left\| \begin{matrix} x \\ r^* \end{matrix} \right\| (t)$  is written as follows:

$$w_T(t) - f \left( \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\| \right) - u_z \left( t, \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\|, 0 \right) - w_0(t, \theta) \cos \theta - u_0(t, \theta) \sin \theta = \begin{cases} 0, & \text{if } \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\| \leq \left\| \begin{matrix} x^* \\ r^* \end{matrix} \right\| (t), \\ \varepsilon < 0, & \text{if } \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\| > \left\| \begin{matrix} x^* \\ r^* \end{matrix} \right\| (t), \end{cases}$$

We assume that the contact area is simply connected region, and this statement is equivalent to the fact that the stresses normal to the contact area are compressive:

$$\sigma_{zz}|_{z=0} < 0, \quad \left\| \begin{matrix} x \\ r \end{matrix} \right\| < \left\| \begin{matrix} x^* \\ r^* \end{matrix} \right\| (t).$$

Based on (5), the boundary conditions in the absence of friction in the contact zone can be formulated as follows:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_z}{\partial t} \Big|_{z=0} &\equiv V \left( t, \left\| \frac{x}{r} \right\| \right) = v_T(t) - \frac{\partial w_0(t, \theta)}{\partial t} \cos \theta - \\ &- \frac{\partial u_0(t, \theta)}{\partial t} \sin \theta, \quad \left\| \frac{x}{r} \right\| < \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| (t), \\ \sigma_{zz} \Big|_{z=0} &= 0, \quad \left\| \frac{x}{r} \right\| > \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| (t), \quad \sigma_{zz} \Big|_{z=0} = 0, \quad \left\| \frac{x}{r} \right\| < \infty \\ & \left\| \frac{x}{r} \right\| > 0. \end{aligned} \quad (9)$$

The initial conditions for potentials and – are zero:

$$\varphi \Big|_{t=0} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad \psi \Big|_{t=0} = \frac{\partial \psi}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (10)$$

For the problem of impact of an elastic shell on an elastic half-space, the velocity and displacement of the impacting body are found from the equation of motion by integrating it.

The equation of motion of a shell of mass  $M$  for the problem of impact with an initial velocity  $V_0$  has the form:

$$M \frac{d^2 w_T(t)}{dt^2} = -P(t), \quad (11)$$

$$v_T(t) \Big|_{t=0} = V_0, \quad w_T(t) \Big|_{t=0} = 0, \quad (12)$$

$$P(t) = -2 \int_0^{\left\| \frac{x^*}{r^*} \right\|} \frac{1}{\pi r} \int_0^{\left\| \frac{x}{r} \right\|} \sigma_{zz} \left( t, \left\| \frac{x}{r} \right\|, 0 \right) d \left\| \frac{x}{r} \right\|. \quad (13)$$

The condition for the absence of disturbances ahead of the front of longitudinal waves and the condition for damping of disturbances at infinity are valid.

$$\varphi \Big|_{\rho_1 > at + C_\alpha} = 0, \quad \psi \Big|_{\rho_1 > at + C_\alpha} = 0, \quad (14)$$

$$\varphi \Big|_{\rho_1 \rightarrow \infty} \rightarrow 0, \quad \psi \Big|_{\rho_1 \rightarrow \infty} \rightarrow 0, \quad (15)$$

where  $\rho_1 = \left\| \frac{x^2}{r^2} \right\| + z^2$ ,  $C_\alpha = \text{const}$ .

### SOLUTION ALGORITHM

Since the impact process is short-term, the perturbation region at each moment of time  $t$  is finite. Restricting ourselves to a finite interval

of interaction time ( $0 \leq t \leq T$ ), it is possible to select a region of a half-space, which by the time moment  $T$  covers the entire zone of disturbances. From this point of view, for times ( $0 \leq t \leq T$ ), the elastic half-space can be replaced by an elastic half-strip ( $|x| \leq l$ ;  $z \geq 0$ ) in case of plane problem and half-cylinder ( $r \leq l$ ;  $z \geq 0$ ) in case of axisymmetric problem, the boundaries of which do not reach the perturbations by the time  $T$ .

$$l = \alpha T + \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| (T).$$

Thus, for times ( $0 \leq t \leq T$ ), the considered problem is reduced to a nonstationary problem for a half-strip and a half-cylinder with mixed boundary conditions at its end. To represent the displacement vector as:

$$u = \text{grad} \varphi + \text{rot} \psi, \quad \text{div} \psi = 0,$$

on the lateral surface of the half-strip and the half-cylinder, we select, for example, the conditions for sliding termination:

$$u \Big|_{\left\| \frac{x}{r} \right\| = l} = 0, \quad \sigma_{zz} \Big|_{\left\| \frac{x}{r} \right\| = l} = 0, \quad (16)$$

or

$$u_z \Big|_{\left\| \frac{x}{r} \right\| = l} = 0, \quad \sigma_{rr} \Big|_{\left\| \frac{x}{r} \right\| = l} = 0. \quad (17)$$

Consider the initial - boundary value problem (2) or (3), (4), (9) – (12). Let us represent the normal  $w_0(t, \theta)$  and tangential  $u_0(t, \theta)$  displacements of the points of the middle surface of the shell and the radial  $p(t, \theta)$  and tangential  $q(t, \theta)$  components of the distributed external load acting on the shell in the form of trigonometric Fourier series in case of plane problem and in Legendre polynomials and their derivatives in case of axisymmetric problem.



$$w_0(t, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} w_{0n}(t) \left\| \frac{\cos(n\theta)}{P_n(\cos \theta)} \right\|, \quad (18)$$

$$u_0(t, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} u_{0n}(t) \left\| \frac{\sin(n\theta)}{P_n^1(\cos \theta)} \right\|, \quad (19)$$

$$p(t, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} p_n(t) \left\| \frac{\cos(n\theta)}{P_n(\cos \theta)} \right\|, \quad (20)$$

$$q(t, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) \left\| \frac{\sin(n\theta)}{P_n^1(\cos \theta)} \right\|, \quad (21)$$

$$\Phi(t, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(t) \left\| \frac{\sin(n\theta)}{P_n^1(\cos \theta)} \right\|. \quad (22)$$

In the space of Laplace transformants with parameter  $s$ , the transformants of functions  $\Phi, w_0, u_0, p, q$  will, due to (18) – (22), have the form:

$$w_0^L(s, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} w_{0n}^L(s) \left\| \frac{\cos(n\theta)}{P_n(\cos \theta)} \right\|, \quad (23)$$

$$u_0^L(s, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} u_{0n}^L(s) \left\| \frac{\sin(n\theta)}{P_n^1(\cos \theta)} \right\|, \quad (24)$$

$$p^L(s, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} p_n^L(s) \left\| \frac{\cos(n\theta)}{P_n(\cos \theta)} \right\|, \quad (25)$$

$$q^L(s, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n^L(s) \left\| \frac{\sin(n\theta)}{P_n^1(\cos \theta)} \right\|, \quad (26)$$

$$\Phi^L(s, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n^L(s) \left\| \frac{\sin(n\theta)}{P_n^1(\cos \theta)} \right\|. \quad (27)$$

We apply to the system of equations (2) and (3) the Laplace transform in the variable  $t$  with the parameter  $s$  and substitute their equalities (23) – (27). Equating the coefficients at the same  $\cos(n\theta)$  and  $\sin(n\theta)$  in case of plane problem and  $P_n(\cos \theta)$  and  $P_n^1(\cos \theta)$  in case of axisymmetric problem we obtain the relations connecting the components of the expansion into series of functions  $\Phi^L, w_0^L, u_0^L, p^L$  and  $q^L$ .

$$w_{0,0}^L(s) = \left\| \frac{\frac{\beta_4 p_0^L(s)}{\eta_0^2 s^2 + a_3}}{p_0^L(s)} \right\|, \quad (28)$$

$$w_{0,n}^L(s) = Q_{11}^L(n, s) p_n^L(s) + Q_{12}^L(n, s) q_n^L(s), \quad (29)$$

$$u_{0,n}^L(s) = Q_{21}^L(n, s) p_n^L(s) + Q_{22}^L(n, s) q_n^L(s), \quad (30)$$

$$\Phi_n^L(s) = Q_{31}^L(n, s) p_n^L(s) + Q_{32}^L(n, s) q_n^L(s), \quad (31)$$

where

$$Q_{ij}^L(n, s) = \frac{\left\| \frac{\Delta_{ij}^{cyl}}{\Delta_{ij}^{sph}} \right\| (s)}{\Delta(s)}, \quad (i = \overline{1,3}; j = \overline{1,2}; n = \overline{1, \infty}),$$

$$\Delta_{21}^{cyl}(n, s) = -\beta_4 n [a_2 + (1 + a_4)(\gamma_0^2 s^2 + n^2)],$$

$$\Delta_{22}^{cyl}(n, s) = \beta_3 [(\eta_0^2 s^2 + n^2)(\gamma_0^2 s^2 + n^2) + (\eta_0^2 a_2 + \gamma_0^2 a_3) s^2 + a_3 n^2 + a_2 a_3],$$

$$\Delta_{11}^{cyl}(n, s) = \beta_4 [(\gamma_0^2 s^2 + n^2)(\gamma_0^2 s^2 + n^2) + a_2 + a_4],$$

$$\Delta_{12}^{cyl}(n, s) = -\beta_3 n [(1 + a_3)(\gamma_0^2 s^2 + n^2) + a_2 a_3],$$

$$\Delta_{31}^{cyl}(n, s) = \beta_4 a_2 [n(\gamma_0^2 s^2 + n^2) - 1],$$

$$\Delta_{32}^{cyl}(n, s) = \beta_3 a_2 [\eta_0^2 s^2 + a_3(1 - n^2)],$$

$$A_a = ((2\eta_0^2 + \gamma_0^2)n^2 + a_3\gamma_0^2 + a_4\eta_0^2) / (\eta_0^2\gamma_0^2),$$

$$B_b = ((\eta_0^2 + 2\gamma_0^2)n^4 + ((a_3 - 2)\gamma_0^2 + a_4\eta_0^2)n^2 + a_2(\eta_0^2\gamma_0^2 + a_3\gamma_0^2 - a_4\eta_0^2) + \gamma_0^2) / (\eta_0^2\gamma_0^4),$$

$$C_c = (n^6 - 2n^4 + (a_2\eta_0^2 + 1)n^2 + a_3 a_4 \eta_0^2) / (\eta_0^2\gamma_0^4),$$

$$\Delta_{11}^{sph}(n, s) = \left( \frac{n(n+1)}{1 - v_0} - \frac{1}{1 - v_0} + \gamma_0^2 s^2 \right) \times$$

$$\times (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R + \eta_0^2 s^2),$$

$$\Delta_{21}^{sph}(n, s) = \left( R_R + \left( \frac{2(1 + v_0)k_s}{1 - v_0} + 1 \right) (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R) + \eta_0^2 s^2 \right) / (2(1 + v_0)Dk_s),$$

$$\Delta_{12}^{sph}(n, s) = \frac{n(n+1)}{1 - v_0} (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R + \eta_0^2 s^2),$$

$$\Delta_{22}^{sph}(n, s) = -\frac{n(n+1)R_R}{2(1 + v_0)k_s} + \left( \frac{n(n+1)}{2(1 + v_0)k_s} + \frac{2}{1 - v_0} + \gamma_0^2 s^2 \right) (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R + \eta_0^2 s^2),$$

$$\Delta_{31}^{sph}(n, s) = \frac{R_R}{h} \left( -n(n+1) + \frac{1}{1 + v_0} + \gamma_0^2 s^2 \right),$$

$$\Delta_{32}^{sph}(n, s) = -\frac{n(n+1)R_R}{(1 - v_0)h}, \quad R_R = \frac{R^2 E_0 h}{2(1 + v_0)Dk_s},$$

$$\Delta(s) = \eta_0^2 \gamma_0^4 \left( \left\| \frac{1}{-1} \right\| s^6 + \left\| \frac{A_a}{-A_a} \right\| s^4 + \left\| \frac{B_b}{-B_b} \right\| s^2 + \left\| \frac{C_c}{-C_c} \right\| \right),$$

$$\bar{A}_a = \frac{1}{\gamma_0^2} \left( \frac{n(n+1)}{1-v_0^2} + \frac{n(n+1)}{2(1+v_0)k_s} + \frac{1}{1+v_0} + \frac{2}{1-v_0} \right) + \frac{1}{\eta_0^2} \left( n(n+1) - 1 + v_0 + \frac{R^2 E_0 h}{2(1+v_0)Dk_s} \right),$$

$$\bar{B}_b = \frac{1}{\eta_0^2 \gamma_0^4} \left( \eta_0^2 \left( \frac{n(n+1)}{1-v_0^2} - \frac{1}{1+v_0} \right) \left( \frac{n(n+1)}{2(1+v_0)k_s} + \frac{2}{1-v_0} \right) + \gamma_0^2 \left( \frac{n(n+1)}{1-v_0^2} + \frac{n(n+1)}{2(1+v_0)k_s} + \frac{1}{1+v_0} + \frac{2}{1-v_0} \right) \left( n(n+1) - 1 + v_0 + \frac{R^2 E_0 h}{2(1+v_0)k_s} + \frac{2}{1-v_0} \right) - \frac{n(n+1)}{2(1+v_0)Dk_s} \left( \frac{\eta_0^2}{(1-v_0)^2} (2(1+v_0)k_s + 1 - v_0) + \frac{\gamma_0^2 R^2 E_0 h}{2(1+v_0)Dk_s} \right) \right),$$

$$\bar{C}_c = \frac{1}{\eta_0^2 \gamma_0^4} \left( \left( \frac{n(n+1)}{1-v_0^2} - \frac{1}{1+v_0} \right) \left( \frac{n(n+1)}{2(1+v_0)k_s} + \frac{2}{1-v_0} \right) \left( n(n+1) - 1 + v_0 + \frac{R^2 E_0 h}{2(1+v_0)Dk_s} \right) - \frac{n(n+1)R^2 E_0 h}{4(1+v_0)^2 Dk_s^2} \right) + \frac{n(n+1)}{2(1-v_0^2)k_s} \times \left( \frac{R^2 E_0 h}{2(1+v_0)Dk_s} - \left( \frac{2(1+v_0)k_s}{1-v_0} + 1 \right) \times \left( n(n+1) - 1 + v_0 + \frac{R^2 E_0 h}{2(1+v_0)Dk_s} \right) \right).$$

Then applying the inverse Laplace transform to (28) – (41), by the theorem on the convolution of the originals of two functions, we have:

$$\dot{w}_{0,0}(t) = \left\| \frac{\beta_4}{\eta_0^2} \right\| \int_0^t p_0(\tau) \times \cos \left( \left\| \frac{1/\eta_0(a_4)^{1/2}}{1/\gamma_0 \sqrt{(1-v_0)/2}} \right\| (t-\tau) \right) d\tau, \quad (32)$$

$$\dot{w}_{0,n}(t) = \int_0^t p_n(\tau) Q_{11}(n, t-\tau) d\tau + \int_0^t q_n(\tau) Q_{12}(n, t-\tau) d\tau, \quad (33)$$

$$\dot{u}_{0,n}(t) = \int_0^t p_n(\tau) Q_{21}(n, t-\tau) d\tau + \int_0^t q_n(\tau) Q_{22}(n, t-\tau) d\tau, \quad (34)$$

$$\dot{\Phi}_n(t) = \int_0^t p_n(\tau) Q_{31}(n, t-\tau) d\tau + \int_0^t q_n(\tau) Q_{32}(n, t-\tau) d\tau, \quad (n = \overline{1, \infty}) \quad (35)$$

where

$$Q_{ij}(n, t) = 4 \left[ \left( \Delta_r \left\| \frac{R_{ij}^{cyl}}{R_{ij}^{sph}} \right\| + \Delta_i \left\| \frac{I_{ij}^{cyl}}{I_{ij}^{sph}} \right\| \right) \text{ch}(r_0 t) \cos(\sigma_0 t) + \left( \Delta_i \left\| \frac{R_{ij}^{cyl}}{R_{ij}^{sph}} \right\| - \Delta_r \left\| \frac{I_{ij}^{cyl}}{I_{ij}^{sph}} \right\| \right) \text{sh}(r_0 t) \sin(\sigma_0 t) \right] / (\Delta_r^2 + \Delta_i^2) + \frac{2\Delta_{ij}(n, s_1^2) (H(s_1^2) \text{ch}(s_1 t) + H(-s_1^2) \cos(s_1 t))}{\Delta'(s_1^2)},$$

where H(x) – Heaviside function,

$$r_0 = (r^2 + \sigma^2)^{1/4} \cos(\varphi / 2),$$

$$\sigma_0 = (r^2 + \sigma^2)^{1/4} \sin(\varphi / 2), \quad \varphi = \text{arctg}(\sigma / r),$$

$$r = -((A+B) / 2 + \bar{A}_a / 3), \quad \sigma = \sqrt{3}(A-B) / 2,$$

$$s_1^2 = A+B - \left\| \frac{A_a}{A_a} \right\| / 3, \quad A = (-q' / 2 + Q^{1/2})^{1/3},$$

$$B = (-q' / 2 - Q^{1/2})^{1/3}, \quad Q = (p' / 3)^3 + (q' / 2)^2,$$

$$q' = 2 \left( \left\| \frac{A_a}{A_a} \right\| / 3 \right)^3 - \left\| \frac{A_a B_b}{A_a B_b} \right\| / 3 + \left\| \frac{C_c}{C_c} \right\|,$$

$$p' = - \left\| \frac{A_a^2}{A_a^2} \right\| / 3 + \left\| \frac{B_b}{B_b} \right\|, \quad r_1 = r^2 - \sigma^2, \quad \sigma_1 = 2r\sigma,$$

$$R_{11}^{cyl} = \beta_4 \left[ \gamma_0^4 r_1 + \gamma_0^2 (2n^2 + a_2 + a_4) r + n^2 (n^2 + a_2 + a_4) \right],$$

$$\begin{aligned}
 I_{11}^{cyl} &= \beta_4 \left[ \gamma_0^4 \sigma_1 + \gamma_0^2 (2n^2 + a_2 + a_4) \sigma \right], \\
 R_{22}^{cyl} &= \beta_3 \left[ \eta_0^2 \gamma_0^2 r_1 + ((\gamma_0^2 + \eta_0^2) n^2 + \eta_0^2 a_2 + \gamma_0^2 a_3) r + \right. \\
 &\quad \left. + n^2 (n^2 + a_3) + a_2 a_3 \right], \\
 I_{22}^{cyl} &= \beta_3 \left[ \eta_0^2 \gamma_0^2 \sigma_1 + ((\gamma_0^2 + \eta_0^2) n^2 + \eta_0^2 a_2 + \gamma_0^2 a_3) \sigma \right], \\
 R_{12}^{cyl} &= -\beta_3 n \left[ (1 + a_3) (\gamma_0^2 r + n^2) + a_2 a_3 \right], \\
 I_{12}^{cyl} &= -\beta_3 n (1 + a_3) \gamma_0^2 \sigma, \quad I_{21} = -\beta_4 n (1 + a_4) \gamma_0^2 \sigma, \\
 R_{21}^{cyl} &= -\beta_4 n \left[ (1 + a_4) (\gamma_0^2 r + n^2) + a_2 \right], \\
 R_{11}^{sph} &= \eta_0^2 \gamma_0^2 r_1 + \left( \eta_0^2 \left( \frac{n(n+1)}{1-v_0} - \frac{1}{1-v_0} \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \gamma_0^2 (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R) \right) r + \\
 &\quad + \left( \frac{n(n+1)}{1-v_0} - \frac{1}{1-v_0} \right) (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R), \\
 I_{11}^{sph} &= \eta_0^2 \gamma_0^2 \sigma_1 + \left( \eta_0^2 \left( \frac{n(n+1)}{1-v_0} - \frac{1}{1-v_0} \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \gamma_0^2 (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R) \right) \sigma, \\
 R_{12}^{sph} &= \frac{n(n+1)}{1-v_0} (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R + \eta_0^2 r), \\
 I_{12}^{sph} &= \eta_0^2 \frac{n(n+1)}{1-v_0} \sigma, \\
 R_{21}^{sph} &= \frac{1}{2(1+v_0) D k_s} \left( \left( \frac{2(1+v_0) k_s}{1-v_0} + 1 \right) \times \right. \\
 &\quad \left. \times (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R + \eta_0^2 r) - R_R \right), \\
 I_{21}^{sph} &= \eta_0^2 \left( \frac{1}{1-v_0} + \frac{1}{2(1+v_0) k_s} \right) \sigma, \\
 R_{22}^{sph} &= \eta_0^2 \gamma_0^2 r_1 + \left( \eta_0^2 \left( \frac{n(n+1)}{2(1+v_0) k_s} + \frac{2}{1-v_0} \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \gamma_0^2 (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R) \right) r + \\
 &\quad + \left( \frac{n(n+1)}{2(1+v_0) k_s} + \frac{2}{1-v_0} \right) (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R) - \\
 &\quad - \frac{n(n+1) R_R}{2(1+v_0) k_s}, \\
 I_{22}^{sph} &= \eta_0^2 \gamma_0^2 \sigma_1 + \left( \eta_0^2 \left( \frac{n(n+1)}{2(1+v_0) k_s} + \frac{2}{1-v_0} \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \gamma_0^2 (n(n+1) - 1 + v_0 + R_R) \right) \sigma,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{31}^{sph} &= \frac{R_R}{h} \left( -n(n+1) + \frac{1}{1-v_0} + \gamma_0^2 r \right), \\
 I_{31}^{sph} &= \gamma_0^2 \frac{R_R}{h} \sigma, \quad R_{32}^{sph} = -\frac{R_R}{h} n(n+1), \quad I_{32}^{sph} = 0, \\
 \Delta'(s) &= \eta_0^2 \gamma_0^4 \left[ \left\| \begin{matrix} 6 \\ -6 \end{matrix} \right\| s^4 + 4 \left\| \begin{matrix} A_a \\ -A_a \end{matrix} \right\| s^2 + 2 \left\| \begin{matrix} B_b \\ -B_b \end{matrix} \right\| \right], \\
 \Delta_r &= \eta_0^2 \gamma_0^4 \left[ \left\| \begin{matrix} 6 \\ -6 \end{matrix} \right\| r_1 + 4 \left\| \begin{matrix} A_a \\ -A_a \end{matrix} \right\| r + 2 \left\| \begin{matrix} B_b \\ -B_b \end{matrix} \right\| \right], \\
 \Delta_i &= \eta_0^2 \gamma_0^4 \left[ \left\| \begin{matrix} 6 \\ -6 \end{matrix} \right\| \sigma_1 + 4 \left\| \begin{matrix} A_a \\ -A_a \end{matrix} \right\| \sigma \right]. \\
 w_{0,0}(t) &= \left\| \begin{matrix} \beta_4 (a_4)^{1/2} / \eta_0 \\ 1/\gamma_0 \end{matrix} \right\| \int_0^t p_0(\tau) \times \\
 &\quad \times \sin \left( \left\| \begin{matrix} 1/\eta_0 (a_4)^{1/2} \\ 1/\gamma_0 \sqrt{(1-v_0)/2} \end{matrix} \right\| (t-\tau) \right) d\tau, \\
 w_{0,n}(t) &= \int_0^t p_n(\tau) \tilde{Q}_{11}(n, t-\tau) d\tau + \\
 &\quad + \int_0^t q_n(\tau) \tilde{Q}_{12}(n, t-\tau) d\tau, \tag{36}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{0,n}(t) &= \int_0^t p_n(\tau) \tilde{Q}_{21}(n, t-\tau) d\tau + \tag{37} \\
 &\quad + \int_0^t q_n(\tau) \tilde{Q}_{22}(n, t-\tau) d\tau, \\
 \Phi_n(t) &= \int_0^t p_n(\tau) \tilde{Q}_{31}(n, t-\tau) d\tau + \\
 &\quad + \int_0^t q_n(\tau) \tilde{Q}_{32}(n, t-\tau) d\tau, \quad (n = \overline{1, \infty})
 \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned}
 \tilde{Q}_{ij}(n, t) &= 4 \left[ \left( \delta_r \left\| \begin{matrix} R_{ij}^{cyl} \\ R_{ij}^{sph} \end{matrix} \right\| + \delta_i \left\| \begin{matrix} I_{ij}^{cyl} \\ I_{ij}^{sph} \end{matrix} \right\| \right) \text{sh}(r_0 t) \cos(\sigma_0 t) + \right. \\
 &\quad \left. + \left( \delta_i \left\| \begin{matrix} R_{ij}^{cyl} \\ R_{ij}^{sph} \end{matrix} \right\| - \delta_r \left\| \begin{matrix} I_{ij}^{cyl} \\ I_{ij}^{sph} \end{matrix} \right\| \right) \text{ch}(r_0 t) \sin(\sigma_0 t) \right] / (\delta_r^2 + \delta_i^2) + \\
 &\quad + \frac{2\Delta_{ij}(n, s_1^2) (H(s_1^2) \text{sh}(s_1 t) + H(-s_1^2) \sin(s_1 t))}{(s_1 \Delta'(s_1^2))}, \\
 \delta_r &= r_0 \Delta_r - \sigma_0 \Delta_i, \quad \delta_i = \sigma_0 \Delta_r + r_0 \Delta_i.
 \end{aligned}$$

We apply to the system of equations (2) and

(3) the Laplace transform in the variable  $t$  ( $s$  is the transformation parameter) and the Fourier method of separation of variables, considering the evenness in  $x$  of the potential  $\varphi$  and the oddness of the potential  $\psi$ , and require the satisfaction of condition (14) – (15). Then [2 – 6], in the space of Laplace transformants, we obtain the following representations for wave potentials [7 – 9, 11]:

$$\begin{aligned} \varphi^L \left( s, \left\| \frac{x}{r} \right\|, z \right) &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n(s) \times \\ &\times \exp \left( -z \sqrt{\frac{s^2}{\alpha^2} + \lambda_n^2} \right) \left\| \frac{\cos \lambda_n x}{J_0(\lambda_n r)} \right\|, \\ \psi^L \left( s, \left\| \frac{x}{r} \right\|, z \right) &= \sum_{n=0}^{\infty} B_n(s) \times \\ &\times \exp \left( -z \sqrt{\frac{s^2}{\beta^2} + \lambda_n^2} \right) \left\| \frac{\sin \lambda_n x}{J_1(\lambda_n r)} \right\|, \end{aligned} \quad (38)$$

where  $\lambda_n$  – the eigenvalues of the problem, which are determined from conditions (16) considering (5) in case of plane problem equal  $\lambda_n = n\pi/l$ , and in case of axisymmetric problem are the roots of the equality:

$$J_1(\lambda_n l) = 0, \quad (n = \overline{0, \infty}).$$

In (38)  $A_n(s)$  and  $B_n(s)$  are determined from the boundary conditions. It follows from representations (38) and relations (5) that the sought-for functions on the surface of a half-space are represented as series in the system of eigenfunctions of the corresponding problems.

$$\begin{aligned} u_z \left( t, \left\| \frac{x}{r} \right\|, 0 \right) &= \sum_{n=0}^{\infty} u_{zn}(t) \left\| \frac{\cos \lambda_n x}{J_0(\lambda_n r)} \right\|, \\ u_{\left\| \frac{x}{r} \right\|} \left( t, \left\| \frac{x}{r} \right\|, 0 \right) &= \sum_{n=0}^{\infty} u_{\left\| \frac{x}{r} \right\| n}(t) \left\| \frac{\sin \lambda_n x}{J_1(\lambda_n r)} \right\|, \\ \sigma_{zz} \left( t, \left\| \frac{x}{r} \right\|, 0 \right) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_{zn}(t) \left\| \frac{\cos \lambda_n x}{J_0(\lambda_n r)} \right\|, \\ \sigma_{\left\| \frac{x}{r} \right\| z} \left( t, \left\| \frac{x}{r} \right\|, 0 \right) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sigma_{\left\| \frac{x}{r} \right\| zn}(t) \left\| \frac{\sin \lambda_n x}{J_1(\lambda_n r)} \right\| J_1(\lambda_n r). \end{aligned}$$

Just as in [2 – 6], the dependence between the harmonics of the vertical component of the velocity and normal stresses on the surface of the half-space is determined [7 – 9, 11]:

$$\sigma_{zn}(t) = -\alpha \left( V_n(t) + \int_0^t V_n(\tau) F(t - \tau) d\tau \right), \quad (39)$$

where

$$\begin{aligned} F_n(t) &= -\alpha \lambda_n J_1(\alpha \lambda_n t) + 2b\beta \lambda_n \left\{ \beta^2 \lambda_n^2 t^2 (\bar{J}_0(\alpha \lambda_n t) - \right. \\ &- \bar{J}_0(\beta \lambda_n t) - J_1(\alpha \lambda_n t) + J_1(\beta \lambda_n t)) + \beta \lambda_n t \times \\ &\times (bJ_0(\alpha \lambda_n t) - J_0(\beta \lambda_n t)) + (2 - b^2) \bar{J}_0(\alpha \lambda_n t) - \\ &\left. - \bar{J}_0(\beta \lambda_n t) \right\}, \end{aligned}$$

where  $J_0(t)$ ,  $J_1(t)$  – Bessel functions of the first kind of zero and first order, respectively, and the function  $\bar{J}_0(t)$  is defined as follows:

$$\bar{J}_0(t) = \int_0^t J_0(\tau) d\tau.$$

Further, we will satisfy the mixed boundary conditions (9). From (9), (39) we obtain the following representation for the vertical component of the velocity on the surface of the half-space:

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} V_n(t) \left\| \frac{\cos \lambda_n x}{J_0(\lambda_n r)} \right\| &= H \left( \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| - \left\| \frac{x}{r} \right\| \right) \times \\ &\times \{v_T(t) - \dot{w}_0(t, \theta) \cos \theta - \dot{u}_0(t, \theta) \sin \theta\} - \\ &- H \left( \left\| \frac{x}{r} \right\| - \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| \right) \sum_{n=0}^{\infty} \left\| \frac{\cos \lambda_n x}{J_0(\lambda_n r)} \right\| \int_0^t V_n(\tau) F_n(t - \tau) d\tau. \end{aligned} \quad (40)$$

Substituting (23) and (24) into (40) with allowance for  $\left\| \frac{x}{r} \right\| = \sin \theta$ , arising from geometric considerations in the zone of the contact region, and representing both parts of (40) in the form of series in  $\left\| \frac{\cos \lambda_n x}{J_0(\lambda_n r)} \right\|$ , we obtain an infinite system of Volterra integral equations (ISVIE) of the second kind regarding to unknown harmonics velocity on the surface of the half-space ( $n = \overline{0, \infty}$ ):

$$V_n(t) + \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_{mn}^{(1)} \left( \left\| \begin{matrix} x^* \\ r^* \end{matrix} \right\| \right) \int_0^t V_m(\tau) F_m(t-\tau) d\tau +$$

$$+ \sum_{m=0}^{\infty} \left[ \alpha_{mn}^{(2)} \left( \left\| \begin{matrix} x^* \\ r^* \end{matrix} \right\| \right) \dot{w}_{0m}(t) + \alpha_{mn}^{(3)} \left( \left\| \begin{matrix} x^* \\ r^* \end{matrix} \right\| \right) \dot{u}_{0m}(t) \right] \times$$

$$\int_0^t V_m(\tau) F_m(t-\tau) d\tau = C_n^{(1)} \left( \left\| \begin{matrix} x^* \\ r^* \end{matrix} \right\| \right) v_T(t),$$

where

$$\alpha_{mn}^{(1)}(x^*) = \frac{1}{N_n^2} \int_{x^*}^l \cos \lambda_m x \cos \lambda_n x dx,$$

$$\alpha_{mn}^{(2)}(x^*) = \frac{1}{N_n^2} \int_0^{x^*} \sqrt{1-x^2} D_{1m}(x) \cos \lambda_n x dx,$$

$$\alpha_{mn}^{(3)}(x^*) = \frac{1}{N_n^2} \int_0^{x^*} x B_{1m}(x) \cos \lambda_n x dx,$$

$$C_n^{(1)}(x^*) = \frac{1}{N_n^2} \int_0^{x^*} \cos \lambda_n x dx, \quad N_n^2 = \int_0^l \cos^2 \lambda_n x dx,$$

$$D_{1m}(x) = \cos(m\pi/2) T_m(x) + \sin(m\pi/2) U_m(x),$$

$$B_{1m}(x) = \sin(m\pi/2) T_m(x) - \cos(m\pi/2) U_m(x),$$

$$\alpha_{mn}^{(4)}(r^*) = \frac{1}{N_n^2} \int_{r^*}^l r J_0(\lambda_m r) J_0(\lambda_n r) dr,$$

$$\alpha_{mn}^{(5)}(r^*) = \frac{1}{N_n^2} \int_0^{r^*} r \sqrt{1-r^2} P_m(\sqrt{1-r^2}) J_0(\lambda_n r) dr,$$

$$\alpha_{mn}^{(6)}(r^*) = \frac{1}{K_n^2} \int_0^{r^*} r^2 \sqrt{1-r^2} \frac{\partial}{\partial r} P_m(\sqrt{1-r^2}) J_0(\lambda_n r) dr,$$

$$C_n^{(2)}(r^*) = \frac{1}{K_n^2} \int_0^{r^*} r J_0(\lambda_n r) dr, \quad K_n^2 = \int_0^l r (J_0(\lambda_n r))^2 dr.$$

here  $T_m(x)$  and  $U_m(x)$  – Chebyshev polynomials of the first and second kind.

The functions  $\dot{w}_{0m}(t)$ ,  $\dot{u}_{0m}(t)$  and  $\dot{\Phi}_n(t)$  are determined from relations (32) – (35), but they involve unknown functions  $p_n(t)$  and  $q_n(t)$ . Let us deal with their exclusion, for this we use conditions (7), (8), which can be rewritten using (39) in the form:

$$\sum_{n=0}^{\infty} p_n(t) \left\| \begin{matrix} \cos n\theta \\ P_n(\cos \theta) \end{matrix} \right\| = \alpha(\theta^* - |\theta|) \cos \theta \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{\infty} \left\| \begin{matrix} \cos(\lambda_n \sin \theta) \\ J_0(\lambda_n \sin \theta) \end{matrix} \right\| \left( V_n(t) + \int_0^t V_n(\tau) F_n(t-\tau) d\tau \right),$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} q_n(t) \left\| \begin{matrix} \sin n\theta \\ P_n^1(\sin \theta) \end{matrix} \right\| = \alpha H(\theta^* - |\theta|) \sin \theta \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{\infty} \left\| \begin{matrix} \cos(\lambda_n \sin \theta) \\ J_0(\lambda_n \sin \theta) \end{matrix} \right\| \left( V_n(t) + \int_0^t V_n(\tau) F_n(t-\tau) d\tau \right).$$

Using the orthogonality of the trigonometrical functions and the polynomials and the associated Legendre polynomials, we obtain the relations establishing the relationship between the harmonics of the series expansions of the functions  $p$ ,  $q$  and  $V$ :

$$p_n(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \gamma_{mn}^{(1)}(\theta^*) \left( V_m(t) + \int_0^t V_m(\tau) F_m(t-\tau) d\tau \right),$$

$$q_n(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \gamma_{mn}^{(2)}(\theta^*) \left( V_m(t) + \int_0^t V_m(\tau) F_m(t-\tau) d\tau \right),$$

where

$$\gamma_{mn}^{(1)}(\theta^*) = \frac{\alpha}{\bar{N}_n^2} \int_0^{\theta^*} \cos \theta \cos n\theta \cos(\lambda_m \sin \theta) d\theta,$$

$$\gamma_{mn}^{(2)}(\theta^*) = \frac{\alpha}{\tilde{N}_n^2} \int_0^{\theta^*} \sin \theta \sin n\theta \cos(\lambda_m \sin \theta) d\theta,$$

$$\bar{N}_n^2 = \int_0^{\pi} \cos^2 n\theta d\theta, \quad \tilde{N}_n^2 = \int_0^{\pi} \sin^2 n\theta d\theta.$$

$$\gamma_{mn}^{(3)}(\theta^*) = \frac{\alpha}{\bar{K}_n^2} \int_0^{\theta^*} \cos \theta \sin \theta P_n(\cos \theta) J_0(\lambda_m \sin \theta) d\theta,$$

$$\gamma_{mn}^{(4)}(\theta^*) = \frac{\alpha}{\tilde{K}_n^2} \int_0^{\theta^*} \sin^2 \theta P_n^1(\cos \theta) J_0(\lambda_m \sin \theta) d\theta,$$

$$\gamma_{mn}^{(3)}(\theta^*) = \frac{\alpha}{\bar{K}_n^2} \int_0^{\theta^*} \cos \theta \sin \theta P_n(\cos \theta) J_0(\lambda_m \sin \theta) d\theta,$$

$$\gamma_{mn}^{(4)}(\theta^*) = \frac{\alpha}{\tilde{K}_n^2} \int_0^{\theta^*} \sin^2 \theta P_n^1(\cos \theta) J_0(\lambda_m \sin \theta) d\theta,$$

$$\bar{K}_n^2 = \int_0^{\pi} \sin \theta (P_n(\cos \theta))^2 d\theta,$$

$$\tilde{K}_n^2 = \int_0^\pi \sin \theta (P_n^1(\cos \theta))^2 d\theta.$$

Thus, the final form of the resolving ISVIE of the second kind will be as follows:

$$\begin{aligned} & V_n(t) + \sum_{m=0}^{\infty} \left\| \alpha_{mn}^{(1)}(x^*) \right\| \int_0^t V_m(\tau) F_m(t-\tau) d\tau + \\ & + \sum_{m=0}^{\infty} \left\| \alpha_{mn}^{(2)}(x^*) \right\| \left\| \alpha_{mn}^{(4)}(r^*) \right\| \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^t \gamma_{km}^{(1)}(\theta^*(\tau)) (V_k(\tau) + \\ & + \int_0^\tau V_k(\xi) F_k(\tau-\xi) d\xi) Q_{11}(m, t-\tau) d\tau + \\ & + \sum_{m=0}^{\infty} \left\| \alpha_{mn}^{(2)}(x^*) \right\| \left\| \alpha_{mn}^{(5)}(r^*) \right\| \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^t \gamma_{km}^{(2)}(\theta^*(\tau)) (V_k(\tau) + \\ & + \int_0^\tau V_k(\xi) F_k(\tau-\xi) d\xi) Q_{12}(m, t-\tau) d\tau + \\ & + \sum_{m=0}^{\infty} \left\| \alpha_{mn}^{(3)}(x^*) \right\| \left\| \alpha_{mn}^{(6)}(r^*) \right\| \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^t \gamma_{km}^{(3)}(\theta^*(\tau)) (V_k(\tau) + \\ & + \int_0^\tau V_k(\xi) F_k(\tau-\xi) d\xi) Q_{21}(m, t-\tau) d\tau + \\ & + \sum_{m=0}^{\infty} \left\| \alpha_{mn}^{(3)}(x^*) \right\| \left\| \alpha_{mn}^{(6)}(r^*) \right\| \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^t \gamma_{km}^{(4)}(\theta^*(\tau)) (V_k(\tau) + \\ & + \int_0^\tau V_k(\xi) F_k(\tau-\xi) d\xi) Q_{22}(m, t-\tau) d\tau = \\ & = C_n^{(1)} \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| v_T(t), \quad (n = \overline{0, \infty}). \end{aligned} \tag{41}$$

To solve the problem, when the shell penetration velocity  $v_T(t)$  is a predetermined function, it is sufficient to numerically implement equations (41).

The expression for the reaction force of the elastic half-space (13), using (39), can be rewritten as:

$$P(t) = -2 \int_0^{\left\| \frac{x^*}{r^*} \right\|(t)} \left\| \frac{1}{\pi r} \right\| \sigma_{zz} \left( t, \left\| \frac{x}{r} \right\|, 0 \right) d \left\| \frac{x}{r} \right\| =$$

$$\begin{aligned} & = \alpha \left\| \frac{1}{\pi r^*} \right\| \left\| v_T(t) \right\| \left\| \frac{2x^*}{r^*} \right\| (t) + \\ & + 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n} \left\| \frac{\sin \lambda_n x^*}{J_1(\lambda_n r^*)} \right\| \int_0^t V_n(\tau) F_n(t-\tau) d\tau \left\{ \right. \end{aligned}$$

The equation of motion of the shell (11) with the initial conditions takes the form:

$$\begin{aligned} M \frac{dv_T(t)}{dt} = & -\alpha \left\| \frac{2}{\pi r^*} \right\| \left\{ v_T(t) r^*(t) + \right. \\ & \left. + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n} \left\| \frac{\sin \lambda_n x^*}{2J_n(\lambda_n r^*)} \right\| \int_0^t V_n(\tau) F_n(t-\tau) d\tau \right\}. \end{aligned} \tag{42}$$

To solve the problem of impact with an initial velocity  $V_0$ , the system of equations (41) must be supplemented with the equation of motion (42).

The contact area is determined considering the rise of the medium from the condition:

$$\begin{aligned} & \delta_{1j} v_T t + \delta_{2j} \int_0^t v_T(\tau) d\tau - f \left( \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| \right) - \\ & - \sum_{n=0}^{\infty} \left\| \frac{\cos \lambda_n x^*}{J_0(\lambda_n r^*)} \right\| \int_0^t V_n(\tau) d\tau - \\ & - \sqrt{1 - \left\| \frac{x^{*2}}{r^{*2}} \right\|} \sum_{n=0}^{\infty} \left\| \frac{\cos(n \arcsin x^*)}{P_n(\sqrt{1-r^{*2}})} \right\| \times \\ & \times \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^t \gamma_{mn}^{(1)} \left( \arcsin \left( \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| \right) (\tau) \right) \tilde{Q}_{11}(n, t-\tau) + \\ & + \gamma_{mn}^{(2)} \left( \arcsin \left( \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| \right) (\tau) \right) \tilde{Q}_{12}(n, t-\tau) \left[ \right] \times \\ & \times \left( V_m(\tau) + \int_0^\tau V_m(\xi) F_m(\tau-\xi) d\xi \right) d\tau - \end{aligned} \tag{43}$$

$$\begin{aligned}
 & - \left( \left\| \frac{x^*}{r^* \sqrt{1-r^{*2}}} \right\| \right) \sum_{n=0}^{\infty} \left\| \frac{\sin(n \arcsin x^*)}{P_n^1(\sqrt{1-r^{*2}})} \right\| \times \\
 & \times \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^t \left[ \gamma_{mn}^{(1)} \left( \arcsin \left( \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| \right) (\tau) \right) \tilde{Q}_{21}(n, t-\tau) + \right. \\
 & \left. + \gamma_{mn}^{(2)} \arcsin \left( \left\| \frac{x^*}{r^*} \right\| \right) (\tau) \tilde{Q}_{22}(n, t-\tau) \right] \times \\
 & \times \left( V_m(\tau) + \int_0^{\tau} V_m(\xi) F_m(\tau-\xi) d\xi \right) d\tau = \\
 & = \begin{cases} 0, & \text{if } \left( \left\| x \right\| < x^*(t) \right) \\ & \left( \left\| r \right\| < r^*(t) \right) \\ \varepsilon < 0, & \text{if } \left( \left\| x \right\| > x^*(t) \right) \\ & \left( \left\| r \right\| > r^*(t) \right) \end{cases}
 \end{aligned}$$

here  $\delta_{ij} = \{0, \text{ if } i \neq j; 1, \text{ if } i = j\}$  – Kronecker symbol. Index  $j=1$  corresponds to the case when the body penetrates into the medium at a speed varying according to a predetermined law (setting 1); if the velocity of the penetrating body is known only at the initial moment of time  $t=0$ , and at subsequent moments is determined from the equation of motion (statement 2), then  $j=2$ . If we exclude the fourth term in relation (43), then we obtain a condition from which the boundary of the contact region is determined without considering the rise of the medium.

### NUMERICAL SOLUTION

The size of reduction  $N$  of the ISVIE of the second kind will be chosen from considerations of practical convergence. In case of plane problem

To smooth out the oscillations arising from the summation of a finite number of terms of the series, as well as Gibbs phenomena near points of weak discontinuity, the averaging operation was used, defined in [2 – 6], which, in the case of a sum of a finite number of terms of the trigonometric series, to memberwise multiplication of the members of the finite sum on  $\sigma_n$  – Lanczos multipliers [8, 9, 11].

$$\sigma_n = \begin{cases} 1, & \text{if } n = 0, \\ \frac{\sin(n\pi/N)}{n\pi/N}, & \text{if } n \neq 0, \end{cases}$$

The integrals were calculated using the method of mechanical quadratures, in particular, the symmetric Gregory quadrature formula for equidistant nodes. The Cauchy problem for the differential equation (52) was solved by the Adams method (closed-type formulas) [2 – 6] of order  $m_1$  with a local truncation error  $O(\Delta t^{m_1+1})$  [7 – 9, 11]. As a result of discretization, we obtain a system of linear algebraic equations (SLAE). Calculations have shown that with an increase in the reduction size  $N$ , the determinant of the SLAE matrix increases indefinitely. The SLAE is poorly defined: as the reduction size  $N$  tends to infinity, the value of the determinant of the SLAE matrix also tends to infinity. This is due to the fact that the kernels  $Q_{11}(n, t)$ ,  $Q_{22}(n, t)$  in (43), (44) have asymptotic  $\exp(O(n))$  in the parameter  $n$ ,  $\tilde{Q}_{11}(n, t)$  and  $\tilde{Q}_{22}(n, t)$  in (46) and (47) have asymptotic  $O\left(\frac{1}{n}\right)\exp(O(n))$  in the parameter  $n$ . Methods of Tikhonov regularization and orthogonal polynomials do not work to neutralize such an exponential singularity. The approach [1 – 5] for solving problems of dynamics makes it impossible to study the impact of elastic cylindrical and spheric shells of the S.P. Timoshenko type and elastic bodies on an elastic foundation [7 – 9, 11]. In addition, this approach makes it possible to determine the stress-strain state only on the surface of the medium into which the striker penetrates.

### CONCLUSIONS

As a result of an attempt to solve the plane and the axisymmetric problems of the impact of a cylindrical and a spheric fine shells of the S.P. Timoshenko type on the surface of an elastic half-space, applying the method of reduction of dynamic problems to infinite systems of Voltaire's equations of the second kind, the limitations of this technique were

revealed. This technique does not allow solving plane and axisymmetric [1] problems of dynamics for refined shells of the S.P. Timoshenko type and elastic bodies.

To solve [10, 12 – 15] the problems of impact and nonstationary interaction [16 – 20], the elastoplastic formulation [21 – 23] can be used. It should be noted that to calibrate the computational [2] process in the elastoplastic formulation at the elastic stage, it is convenient and expedient to use the technique [2 – 6] for solving the problems of dynamics, developed in [7 – 9, 11].

#### REFERENCES

1. **Bogdanov V.R., 2021.** One approach to the axisymmetric problem of impact of fine shells of the S.P. Timoshenko type on elastic half-space. *Transfer of Innovative Technologies*. Vol.4 No.01, 68-74.
2. **Bogdanov V.R., 2018.** Impact a circular cylinder with a flat on an elastic layer. *Transfer of Innovative Technologies*, Vol.01(2), 68-74.
3. **Bogdanov V.R., 2017.** Impact of a hard cylinder with flat surface on the elastic layer. *Underwater Technologies*, Vol.05, 8-15.
4. **Bogdanov V.R., Lewicki H.R., Pryhodko T.B., Radzivil O.Y., Samborska L.R., 2009.** The planar problem of the impact shell against elastic layer. *Visnyk NTU, Kyiv*, No. 18, 281-292 (in Ukrainian).
5. **Kubenko V.D., Bogdanov V.R., 1995.** Planar problem of the impact of a shell on an elastic half-space. *International Applied Mechanics*, 31, No. 6, 483-490.
6. **Kubenko V.D., Bogdanov V.R., 1995.** Axisymmetric impact of a shell on an elastic halfspace. *International Applied Mechanics*, 31, No.10, 829-835.
7. **Kubenko V.D., Popov S.N., Bogdanov V.R., 1995.** The impact of elastic cylindrical shell with the surface of elastic half-space. *Dop. NAN Ukrainy*, No. 7, 40-44 (in Ukrainian).
8. **Kubenko V.D., Popov S.N., 1988.** Plane problem of the impact of hard blunt body on the surface of an elastic half-space. *Prikl. Mekhanika*, 24, No.7, 69-77 (in Russian).
9. **Popov S.N., 1989.** Vertical impact of the hard circular cylinder lateral surface on the elastic half-space. *Prikl. Mekhanika*, 25, No.12, 41-47 (in Russian).
10. **Bogdanov V.R., Sulim G.T., 2016.** Determination of the material fracture toughness by numerical analysis of 3D elastoplastic dynamic deformation. *Mechanics of Solids*, 51(2), 206-215; DOI 10.3103/S0025654416020084.
11. **Bogdanov V.R., 2015.** A plane problem of impact of hard cylinder with elastic layer. *Bulletin of University of Kyiv: Mathematics. Mechanics*, No. 34, 42-47 (in Ukrainian).
12. **Bogdanov V.R., Sulym G.T., 2013.** Plain deformation of elastoplastic material with profile shaped as a compact specimen (dynamic loading) // *Mechanics of Solids*, May, 48(4), 329–336; DOI 10.3103/S0025654413030096.
13. **Bogdanov V.R., Sulym G.T., 2013.** A modeling of plastic deformation's growth under impact, based on a numerical solution of the plane stress deformation problem // *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta*, Volume 20, Iss. 3, 196-201 (in Russian).
14. **Bogdanov V.R., 2009.** Three dimension problem of plastic deformations and stresses concentration near the top of crack. // *Bulletin of University of Kyiv: Series: Physics & Mathematics*, No. 2, 51-56 (in Ukrainian).
15. **Bogdanov V.R., Sulym G.T., 2012.** The plane strain state of the material with stationary crack with taking in account the process of unloading. *Mathematical Methods and Physicomechanical Fields*, Lviv, 55, No. 3, 132-138. (In Ukrainian)
16. **Bogdanov V.R., Sulym G.T., 2010.** The crack growing in compact specimen by plastic-elastic model of planar stress state. *Bulletin of University of Kyiv: Series: Physics & Mathematics*, No.4, 58-62 (in Ukrainian).
17. **Bogdanov V.R., Sulym G.T., 2010.** The crack cleavage simulation based on the numerical modelling of the plane stress state. *Bulletin of University of Lviv: Series: Physics & Mathematics*, No.73, 192-204 (in Ukrainian).
18. **Bohdanov V.R., Sulym G.T., 2011.** Evaluation of crack resistance based on the numerical modelling of the plane strained state. *Material Science*, 46, No.6, 723-732.
19. **Bogdanov V.R., Sulym G.T., 2011.** The cleavage crack simulation based on the numerical modelling of the plane deformation state. *Scientific collection «Problems of Calculation Mechanics and Constructions Strength»*, Dnepropetrovsk, Nr. 15, 33-44 (in Ukrainian).
20. **Bogdanov V.R., Sulym G.T., 2010.** Destruction toughness determination based on the numerical modelling of the three dimension dynamic problem. *International scientific collection «Strength of Machines and Constructions»*, Kyiv, No.43, 158-167 (in Ukrainian).



21. **Bogdanov V.R., Sulym G.T., 2012.** A three dimension simulation of process of growing crack based on the numerical solution. Scientific collection «Problems of Calculation Mechanics and Constructions Strength», Dnepropetrovsk, No.19, 10-19 (in Ukrainian).
22. **Bogdanov V.R., Sulym G.T., 2012.** The crack cleavage simulation in a compact specimen based on the numerical modelling of the three dimension problem. Scientific collection «Methods of Solving Applied Problems in Solid Mechanics», Dnepropetrovsk, No.13, 60-68 (in Ukrainian).
23. **Bogdanov V.R., 2011.** About three dimension deformation of an elastic-plastic material with the profile of compact shape. Theoretical and Applied Mechanics, Donetsk, No.3 (59), 51-58 (in Ukrainian).
24. **Fedotenkov G.V., 2001.** Cylinder shell impact along elastic semi-plane. Moscow Aviation Institute, 100 (in Russian).
25. **Mihailova E.Y., Tarlakovsky D.V., Vahterova Y.A., 2018.** generalized linear model of the dynamics of thin elastic shells. Scientific Notes of Kazan University, Series of Physics and Mathematics, 160(3), 561-577 (in Russian).
26. **Lokteva N.A., Serduk D.O., Skopintsev P.D., Fedotenkov G.V., 2020.** Non-stationary stress-deformed state of a composite cylindrical shell. Mechanics of Composite Materials and Structures, 26(4), 544-559; DOI: 10.33113/mkmm.ras.2020.26.04.544\_559.08 (in Russian).
27. **Vestyak A.V., Igumnov L.A., Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V., 2016.** The influence of non-stationary pressure on a thin spherical shell with an elastic filler. Computational Continuum Mechanics. 9(4), 443-452. DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.4.37 (in Russian).
28. **Afanasyeva O.A., Mikhailova E.Y., Fedotenkov G.V., 2012.** Random phase of contact interaction of a spherical shell and elastic half space. Problems of Computer Mechanics and Strength of Structures, 20, 19-26 (in Russian).
29. **Michailova E.Y., Tarlakovsky D.V., Fedotenkov G.V., 2014.** Non-stationary contact of a spherical shell and an elastic half-space. Works MAI. 78, 1-26 (in Russian).
30. **Igumnov L.A., Okonechnikov A.S., Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V. 2013.** Plane nonsteady-state problem of motion of the surface load on an elastic half-space. Mathematical Methods and Physicomechanical Fields, Lviv, 56, Nr. 2, 157-163 (in Russian).
31. **Kuznetsova E.L., Tarlakovsky D.V., Fedotenkov G.V., Medvedsky A.L., 2013.** Influence of non-stationary distributed load on the surface of the elastic layer. Works MAI. 71, 1-21 (in Russian).
32. **Fedotenkov G.V., Tarlakovsky D.V., Vahterova Y.A., 2019.** Identification of Non-stationary Load Upon Timoshenko Beam. Lobachevskii Journal of Mathematics, 40(4), 439-447.
33. **Vahterova Y.A., Fedotenkov G.V., 2020.** The inverse problem of recovering an unsteady linear load for an elastic rod of finite length. Journal of Applied Engineering Science, 18(4), 687-692, DOI:10.5937/jaes0-28073.
34. **Gorshkov A.G., Tarlakovsky D.V., 1985.** Dynamic contact problems with moving boundaries. Nauka, Fizmatlit, 352 (in Russian).
35. **Sagomonian A.J., 1985.** Stress waves in a continuous medium. Moscow University Publishing House, 416 (in Russian).

**Один подход к задачам удара оболочек  
типа С.П. Тимошенко об упругое  
полупространство**

*Владислав Богданов*

**Аннотация.** Оболочечные элементы используются во многих тонкостенных конструкциях. Поэтому изучение динамики распространения волновых процессов в тонких оболочках типа С.П. Тимошенко является важным аспектом, так же как важно исследование волновых процессов удара в упругом основании, в которое проникает ударник. Уточненная модель С.П. Тимошенко, описывающая динамику оболочек, позволяет учесть сдвиг и инерцию вращения поперечного сечения оболочки. Хорошо изучены метод сведения решения задач динамики к решению бесконечной системы интегральных уравнений Вольтерра второго рода и сходимости этого решения. Такой подход успешно применялся для случаев исследования задач об ударе твердых тел и упругих тонких оболочек типа Кирхгофа – Лява об упругие полупространство и слой. В данной работе решается плоская и осесимметричная задачи об ударе упругих тонких цилиндрической и сферической оболочек типа С.П. Тимошенко об упругое полупространство методом сведения задач динамики к решению бесконечной системы интегральных уравнений Вольтерра второго рода. В результате попытки решения таким

методом показано, что такой подход неприемлем для исследуемых в данной статье плоской и осесимметричной задач. Дискретизация с использованием методов Грегори для численного интегрирования и Адамса для решения задачи Коши для полученной бесконечной системы уравнений Вольтерра второго рода приводит к решению плохо определенной системы линейных алгебраических уравнений: при увеличении порядка редукции определитель такой системы стремится к бесконечности. Показано, что данная методика не позволяет решать плоские и осесимметричные задачи динамики для тонких оболочек типа С.П. Тимошенко и упругих тел.

Это является ограниченностью такого подхода и показывает необходимость разработки других математических подходов и моделей. Следует отметить, что для калибровки вычислительного процесса в динамической упругопластической постановке на упругом этапе процесса деформирования удобно и целесообразно использовать технику сведения задач динамики к решению бесконечной системы интегральных уравнений Вольтерра второго рода.

**Ключевые слова:** удар, упругость, упругопластичность, полупространство, осесимметричная задача, тонкая сферическая оболочка, С.П. Тимошенко.

## Cybernetyczno-ekonomiczne modele matematyczne autarkii energetycznej w kontekście zadań ekologii integralnej

Walery Wysoczański<sup>1</sup>, Stavian Radev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centrum Ekologii Integralnej "Laudato Si"  
ul. Brazylijska 7, Warszawa, Poland, 03-946  
wyswal@wp.pl, orcid.org/0000-1008-1955-1962

<sup>2</sup>Bulgarian Academy of Science  
ul. acad. G. Bonchev 8, Sofia, Bulgarian, 1113

Przybył 05.06.2021, zaakceptowane 20.09.2021  
<https://doi.org/10.32347/uwt2021.11.1201>

**Dnotaca.** Nazywając na początku tworzenia nauki poezje twórczością, filozofowie próbowali zdefiniować także samo życie i produkt jego ewolucji, czyli człowieka. Cybernetyczna definicja życia jest uznawana za jedną z najlepszych, ponieważ jest ponad religiami. Ze wszystkich religii świata fizyka jest „najreligijniejszą”, a znów z drugiej strony, fizyka empiryczna w tandemie z chemią doświadczalną jest najwięcej antyreligijną. Ekologia integralna jest tą dobrą prostą drogą metodologicznego podejścia rozwiązywania problemów i porażek technologicznych. Wśród wszystkich możliwych relacji znajduje się i klasa wszystkich możliwych zbiorów składających się z obiektów. Niestety dla logiki drugiego rzędu nie istnieje aksjomatyzacja. Rachunek prawd tej logiki nie może być zautomatyzowany. Przechodząc do rozumowania naokoło logiki wielowartościowej, opierając się na stwierdzenie Flaszena, że każdy absurd ma swoją logikę, widzimy jak kolorową, a nie czarnobiałą jest logika! Pomiedzy prawdą a fałszem często pojawia się i trzecia wartość logiczna. Natura, jej warunki powodują przejaw ewolucji. Filozofom nadal trudno jest powiedzieć skąd ono pochodzi, nawet mówią że z kosmosu, to wtedy sporo tajemnic skąd ono się nawet na bliskich planetach? Oto dla tego i życie społeczne jest pod stałą obserwacją ze strony nie tylko filozofów, ale i fizyków i biofizyków, chemików etc. One próbują nawiązać swe poglądy na zmiany stanu Ziemi, na pojawienie się białka, żywych organizmów. Przy tym niektórzy z fizyków budują modele termodynamiczne dla scharakteryzowania entropii i negentropii oraz ich roli w ewolucji, a następnie roli negentropii w generowaniu



**Walery Wysoczański**  
kierownik Centrum Ekologii  
Integralnej "Laudato Si",  
Dr inż.



**Stavian Radev**  
ass.member in Institute of Math.  
and Informatics,  
doktor nauk matematycznych,  
Senior research fellow

rewolucji, wojen. Jest to kolejna utopia i jak komunizm czy kapitalizm są antyludzkimi. Teorii komunistyczne jak i większość innych nie zdają egzaminów. Dla opracowania masywów danych wziętych z życia społecznego, wymaganym jest praktyczne stosowanie zasad teorii mnogości. Wtedy wchodzi w grę logika algebraiczna. Ona ma służyć do uporządkowania dowodów matematycznych. Polscy naukowcy wprowadzają do użytku logiki wielowartościowe. Przy tym większość przedstawicieli nauk społecznych i nawet prawników zapomina o logice prostych zdań. Ma miejsce hipotetyczność w prognostyce suwerenności energetycznej, finansowej itp. Przejaw zjawisk znanych, można by określić w uproszczeniu i w przybliżeniu jako obszar logicznej ignorancji. Ale znów: logika to nauka o weryfikowania i falsyfikowania hipotez. Dalej rozwiniemy tą tezę wraz ze sposobami

dowodzenia. Wprowadzimy pojęcie logiki zdaniowej. Zdania bywają różnego rodzaju – twierdzenia, pytania, rozkazy etc. Twierdzenia mogą być prawdziwe lub nieprawdziwe. Dla rozkazów i pytań określenie ich prawdziwości często nie ma sensu, bo one mogą określać czyny i obiekty. Tylko autarkiczne modele sektorów gospodarczych, przykładowo energetyki, mogą pomóc stosować modelowanie statyczne w bifurkacji finansowej i nawet gospodarczej, w warunkach gospodarki rynkowej. Co ż mówić możemy o modelowaniu stanu makroekonomii.

**Słowa kluczowe:** ekologia integralna, energia, informacja, życie społeczne, model, fizyka empiryczna, elektron, eksperyment, szkoła matematyczna, cybernetyka, prognozowali, modelowania, wartość logiczna.

### WPROWADZANIE

Nazywając na początku tworzenia nauki poezje twórczością, filozofowie próbowali zdefiniować także samo życie i produkt jego ewolucji, czyli człowieka. Cybernetyczna definicja życia jest uznawana za jedną z najlepszych, ponieważ jest ponad religiami. Ze wszystkich religii świata fizyka jest „najreligijniejszą”, a znów z drugiej strony, fizyka empiryczna w tandemie z chemią doświadczalną jest najwięcej antyreligijną. Papież Franciszek na szczęście dla naukowców daje, dla przedstawicieli tych dwóch najpoważniejszych nauk, encykliką „Laudato Si” azymut pojednania nauki z religią nie tylko katolicką ale i resztą monoteistycznych etc. Ekologia integralna jest tą dobrą prostą drogą metodologicznego podejścia rozwiązywania problemów i porażek technologicznych.

Już dawno w dyskusjach naukowych na poziomie Akademii Nauk zrozumieli, że Biblia daje jasność jak z informacji powstała energia a następnie masa. Szczególnie wyrazistym jest to w rozumowaniu dotyczącym atomu a następnie i elektronu. W traktowaniu prymatu pola nad cząsteczkami według prof. Białobrzeskiego, [Pol. No.11, 201]. Najtrudniej jednak jest fizykom odnaleźć siebie w pojednaniu cybernetycznym z informacyjnym polem. Pierwsze rozumowania dotyczącego energii elektronu już parę set lat

temu wymusili fizyków opuścić się do poziomu zamszałej scholastyki. Do dnia dzisiejszego energia i informacja, i to nie tylko na poziomie mikrocząsteczek, uparła się w mur zabaw semantycznych. Jedyne matematyka dyskretna i fizyka statystyczna pozwala wytłumaczyć, a i tak ogólnikowo, przykładowo Grawitacja jest nad tym murem i nikt nie w stanie ciężar informacyjny grawitacji znieść z niego W definiowaniu człowieka najśmieszniej wypadł chyba Platon, którego wyśmiał Diogenes. Następnie życie chcieli zdefiniować jako sposób istnienia ciał białkowych, jako sposób istnienia pewnego stworzenia. Czyim produktem jest życie? Czemu informacja siły wyższej dała życie.

### CEL I METODY

Natura, jej warunki powodują przejaw ewolucji. Filozofom nadal trudno jest powiedzieć skąd ono pochodzi, nawet mówią że z kosmosu, to wtedy sporo tajemnic skąd ono się nawet na bliskich planetach? Oto dla tego i życie społeczne jest pod stałą obserwacją ze strony nie tylko filozofów, ale i fizyków i biofizyków, chemików etc. One próbują nawiązać swe poglądy na zmiany stanu Ziemi, na pojawienie się białka, żywych organizmów. Przy tym niektórzy z fizyków budują modele termodynamiczne dla scharakteryzowania entropii i negentropii oraz ich roli w ewolucji, a następnie roli negentropii w generowaniu rewolucji, wojen. Jest to kolejna utopia i jak komunizm czy kapitalizm są antyludzkimi. Teorii komunistyczne jak i większość innych nie zdają egzaminów. Co można wziąć dla zdefiniowania życia i stworzenia od narodu wybranego i od ich głównego tatusia? Karol Marks, kiedyś jeszcze długo przed synkiem też wyjątkowo wybranych z wybranego rożeńca Symbirska nad Wołgą, próbował, zsyłając się na heglowską dialektykę, poruszyć pytanie alienacji produktu pracy od producenta! Rozpętał on szamotanie w filozofii i swoim prywatnym materializmie historycznym. Alienacja produktu pracy od producenta jest do dnia dzisiejszego kamieniem do rozgryzienia. Niema na razie niestety dobrych

modeli przetrwania cywilizacji. Każdy z nich jest niedoskonały, zresztą jest tylko modelem wymyślonym lub sceptykiem lub optymistą. Już nie jedna cywilizacja zniknęła, bo nie umiała lub nie mogła wypielegnować dobrej religii lub filozofii przetrwania, egzystowania w tych warunkach na jaką zepchnął ją los. Religia stawiała się za zwyczaj tylko praklą mózgu, jako konformista, często nieroba a nawet i pasożyt a nie mądry przywódca nie jeden rabin, przykładowo przeprowadzał swoich owieczek do pieca. Treblinka i wielu innych strasznych, więc tragicznych miejsc temu przykład.

Jak dobrze mówią fizycy, że model to tylko model. Eksperyment, jako weryfikacja empiryczna na przykładzie budowy komunizmu kosztował ponad sto milionów ludzkich żyć. Czy warto go przedłużać omamiając ludzi? Cybernetyczne podejście w definicji życia jest, na dzień dzisiejszy, jedno z najpoważniejszych w świecie naukowym. Zajmując się logiką konstruktywną w jej powiązaniu z cybernetyką, warto pamiętać o dwóch postaciach ostatniej: teoretycznej i praktycznej. Druga jest znana jako cybernetyka stosowana i też może być ukierunkowana na technikę lub na ekonomie. Warto porównać ścieżki i ekonomii i ekologii oraz drogi naukowe w pytaniach prognozowania zmian warunków życia na naszej planecie, przede wszystkim powiązanych z zagrożeniami dla człowieka. Nic nie potrafi tak przybliżyć badania w biologii w tym i w antropologii do nauki jak matematyka w symbiozie z ewolucją. Szkoła matematyczna Kołmogorowa-Uspienskogo zaanonsowała bardzo dobre ale niewystarczająco korektnie zadania dla modelowania procesów społecznych z zastosowaniem podejść informacyjno-cybernetycznych. Rekurencyjne podejście w matematyce dyskretnej w teorii grafów zaproponował serdeczny przyjaciel pierwszego z autorów Wiktor Matiuszkow. Tworzył nowe podejścia w teorii grafów on oraz W.Ergachev z miasta Samarkand. Działał on w Nowosybirsku w Akademii Nauk, potem w Odessie na Uniwersytecie potem od lat 80-

ch pracował w Polsce i mieszkał w Józefowie pod Warszawą.

Szkoła Kołmogorowa miała największy osiągnięcia w prace dla wojska. Uspienski z tej szkoły nigdy nie był wypuszczany ze środowiska radzieckiego. Z tej szkoły pierwszym w homeomorfizmie. Znanym jest z osiągnięć naukowych w tym kierunku matematyk radziecki matematyk Drgalin, a w Polsce Rasiowa, przyjaźnił się on z naukowcami Warszawy. Szkoła Kołmogorowa znana dla pierwszego z zespołu autorów. Wielu ciekawych matematyków jest na szczęście aktywnych i dzisiaj. Instytut Maksa Planka od połowy lat 80-tych ubiegłego wieku ukształtował algorytmy i wydedukował logiczne wnioski o trendach fizyki i o możliwościach matematyki w prognostyce. Sucha cybernetyka, czyli opierająca się na matematykę konwencjonalną, pozwala iść drogą eurystyczną. Mokra cybernetyka, opierająca się na weryfikacje empiryczną, na logikę konstruktywną, a gdzie to jest możliwe, na logikę prostą, pozwala wydedukować logiczne wnioski. Pozwala to w wielu na stwierdzenia naukowe, niektóre z nich mogą dać dla praktyki bardzo ważną wiedzę.

## WYNIKI I DYSKUSJ

Cybernetyczne podejście w poszukiwaniu dróg do rozwiązywania problemów ekologicznych najważniejszych wyjątkowo ważnych w dniu dzisiejszym dla ludności jest jak najbardziej aktualne! Prognozy pesymistyczne w państwach paranoicznych mówią że cywilizacji ziemskiej zostało trzy dekady... Ale to już było! Już nieraz, te idioci, którzy nie tylko sięją strach o końcu świata ale i przybliżają jego, prognozowali Armagedon. Prognoza naukowa procesu wzrastania zagrożeń cywilizacji jest potrzebną coraz więcej. Co będzie za sto lat, nie powie nikt! Co będzie za pół wieku, za dekadę? Nie trudno przewidywać, że w ciągu następnej dekady, czyli dziesięciu lat świat technik komputerowych zmieni się radykalnie, powodując automatycznie ogromną zmianę w zarządzaniu procesami społecznymi, w tym i na rynku pracy i nie tylko. Warta by było

pomyśleć w oszacowaniu zmian i o cybernetycznym prognozowaniu tych wielu czynników procesów. Cybernetyczne podejście warto stosować w tworzeniu algorytmu na przyszłość, chociaż by w odniesieniu do następnej trzeciej dekady nowego tysiąclecia.

Proponujemy w tym podejściu prognostykę w niekonwencjonalnym nurcie metamatematycznym. Spróbujemy спрогноzować, co będzie naokoło nas w kontekście czwartego przejścia technologicznego! Warta podkreślić, że zmiana stereotypów myślenia nawet i dalekich od nauki polityków, będzie odbywać się bardzo dynamicznie. Tak wskazują wszystkie znaki na niebie, tak mówią teraz wspólnie i teolodzy i naukowcy. Zmiany nieodwracalne sensie bezpieczeństwa ekologicznego i w Rzymie, i na Krymie już wskazują na wielkie bifurkacje polityczne. Nauka nie potrafi ratować polityków od zapędów. Nawet i medycyna nie potrafi wyleczyć ich od chciwości. Przed współczesną nauką sporo wyznań i tylko cybernetyczne podejście w zarządzaniu procesami społeczno-gospodarczymi pozwolą wyłuskać ziarno korzystne. Procesy transformacji, szczególnie na rynku pracy będą bolesne.

Niedawno, jeden z młodych ambitnych chirurgów wziął się za przeprowadzenie operacji swego ojca. Ojciec niestety zmarł. Nie chcemy chyba okazać w roli tego chirurga ani tym więcej nieudacznika ojca. Gdy ambicji przerastają kwalifikacji i możliwości realizacji planów, może to być groźnym dla państwa, a w przykładzie do sytuacji rosyjskiej, nawet i bardzo niebezpiecznym dla świata. To nie jest straszenie kogoś, a tylko przypomnienie, że tak już parę razy było. Historia lubi się powtarzać, ale najlepiej aby dla nas nie w tragicznym wariacie, nie przez wojenny sposób łagodzenia stosunków pomiędzy finansjerą wymieszaną z politykami. Czy fatum wisi nad światem? Chyba nie jest aż tak groźnie jak było po wojnie, gdy każdy się cieszył i nawet groził bronią nuklearną.

Zagrożenie totalnej zagłady cywilizacji jest, bo było od początku jej istnienia. Wojny hybrydowe też istniały od czasów

mongolskich i nawet wcześniej. Stosowano każdy rodzaj broni, w tym i masowej zagłady, szczególnie bakteriologicznej. Bezpieczeństwo ontologiczne, jako sztukę przetrwania w dniu dzisiejszym rozpatruje inaczej Ameryka, inaczej Eurazja. Co innego widzi atak jądrowy ruski człowiek a co innego amerykański. Bezpieczeństwo ekologiczne, jako element ontologicznego, powiązane jest z energetyką. Energii, produkowanej człowiekiem, niestety jest nadmiar. Czas na zmiany w samym podejściu do jej wytwarzania, przykładowo z węglowodorów, przejścia do egzergii i do egzergicznego a nie czysto energetycznego podejścia gospodarowania, szczególnie z uwzględnieniem bezpieczeństwa energetycznego. Chodzi tutaj zupełnie nie o braku energii, a o jej nadmiarze w czasie letnim, szczególnie w czasie upału i przy tym w całkowitym zaniedbaniu technologii chłodzenia i ziębienia. Chłód musi stać się towarem latem, tak samo jak ciepło zimą!

Cybernetyka jest tutaj jak najbardziej pomocną. Ciekawym może stać się dla nauki prognozowanie przyszłości i zmian na świecie. Prognozy nie są optymistyczne, szczególnie dla państw których dotknęła zmiana klimatu lokalna. Pomimo równowagi termodynamicznej w skali globalnej, zmiany lokalne klimatu wpływają na katastroficznie na zapasy wody. Przykładowo w państwach afrykańskich nasuwa się zagrożenie dla życia wielu gatunków zwierząt. Ludność cierpi nie mniej. To samo jest w Azji. Europa Zachodnia, państwa południowy jako tako radzą sobie, ale znów przykładowo na Ukrainie zaistniał ogromny problem na Krymie, szczególnie po jego okupacji rosyjskiej. Co najstraszniejsze, w parze z tym pojawia się problem głodu, bezrobocia. Ostatnie wywołane dla tego, że sztuczna inteligencja, jej przyspieszony rozwój w sposób brutalny wypycha z pracy tych, kto nie nadąży i nie w siłach konkurować z komputeryzacją. W najbliższy dwadzieścia lat bezrobocie może zagrażać połowie prace zdolnej ludzkiej populacji. Wiadomo, że aż takiej tragedii na świecie nie będzie, ale dla niektórych państw, jak podają czołowe naukowcy świata, jest ten problem

wyrazistym. Dobrze widać jak paranoidalność naukowców bardzo zależy od tego, w jakich warunkach społecznych egzystują i tworzą swoją prognozę.

Ciężko było być optymistą w nauce Niemcowi w czasach Hitlera. W atmosferze nauki komunistycznej byłem torturowanym poniżanym i gonionym dobrych kilka dekad. Nie łatwo jest teraz i nam naukowcom, w warunkach nasilania się zagrożeń od różnego rodzaju – izmów, zostawać optymistami. Pomóc nam może logika konstruktywna, jako instrument pokonania strachów, a nawet i całkiem zdawało by się normalnych codziennych niepokojów o przyszłość dla dzieci i wnuków. Nic dziwnego że tak smutne prognozy na przetrwanie podają niektórzy naukowcy żydowskie. Warto podkreślić że kryzys moralny jest nie tylko w ich czołowej religii monoteistycznej, ale i w dwóch pokrewnych z nią. Jak podano w nowej analizie jednego z tej warstwy, mamy bardzo smutne zmiany na rynku pracy. Gwałtowna ingerencja w niego w najbliższy czas systemów cybernetyczno-fizycznych pod hasłem rewolucji przemysłowej INDUSTRY-4.0. spowoduje, jak nietrudno przewidywać, wzrost bezrobocia. Bez pracy zostaną nie tylko przykładowo księgowi czy konstruktorzy, ale nawet i i zwykłe pracusi fizyczne. Jeżeli temu nie zapobiegać, będą powtórzenia z przed stu lat.

Komunizm spłodził faszyzm a klincz między nimi zredukował ludność w sposób bestialski. Czy mamy nadal cieszyć się z ilości wyprodukowanych komputerów, podobno jak kiedyś Stalin z Hitlerem cieszyli się z produkcji czołgów. Niestety, ale ekolodzy nie mogą przekonać polityków do robienia dobrych kroków w kierunku budowania przyszłości. Pytanie roli ekologii integralnej są wyjątkowo ważnymi dla nauki współczesnej, a pogłębienie ich znaczenia w przyszłości nie potrzebuje tłumaczeń. Budując modele fenomenologiczne w stosunku do cybernetyki świat naukowy jest mocno spolaryzowany. Tak, uwzględniając wielkie zamieszanie naokoło „teorii wszystkiego” można jednak przeanalizować z pozycji naukometrii logiczną stronę dyskusji, zrobić próbę przejść na

„jedyną teorię pola” nie mając na dzień dzisiejszy jasności w tym, czy pole informacyjne tworzone sztucznym intelektem, (jest to określenie jak sztuczna inteligencja) jest materialnym.

Nie wielu we Lwowie, Kijowie, też i w Polsce wiedzą jak powiązać materie z informacyjnym polem. Instytut Systemów Skondensowanych powstały na wzorec Instytutu w USA nieco odsłonił kurtynę, stosując podejście fizyczno-statystyczne. Profesorowie Jurij Tesla w Kijowie a przed tym Nażup Walitow w Ufie posunęli do przodu opracowania fenomenologicznych modeli ze strony fizyki, pierwszy a ze strony chemii drugi. We Wrocławiu na UW. Młody odnośnie matematyk Zbigniew Pliszka pozwolił jeszcze dalej pójść, opierając te modele na trzeci filar, czyli na dyskretną matematykę. Wszystko było by ok! gdy by w tryby „naukowej bolszewiji” nie trafił pierwszy i ostatni z nich.

W złotym środku pomiędzy religią i chemio-fizyką jest wyższej upomniana teoria Nażypa Chatmułowicza Walitowa. Chaos pola on postawił na dobrą ławę fundamentową. Teoria przyznana w poważnych instytucjach światowych, natomiast i pan Zbigniew Pliszka we Wrocławiu, jak i prof. Jurij Tesla ma nagonkę i nie wie jak uratować siebie, nie mówiąc już o swoich opracowaniach! Nie tylko kiedyś działała inkwizycja w teoretycznej astronomicznej fizyce, w poważnych dziedzinach nauki. Bolszewizm i korupcja jest niezniszczalną w dniach dzisiejszych w szanowanych na świecie państwach w sensie nauki. Polska, Ukraina i Baszkiria mogą być do takich zaliczane.

Do dnia dzisiejszego w cybernetyce niema wyrazistej strukturyzacji. Mało kto rozumie, że opierać się ona musi na dwie ławy fundamentowy. Ważniejsza z nich to technologiczną, obejmującą systemy techniczne, jak otwarte tak również i zamknięte. Przede wszystkim musimy mieć na uwadze zastosowanie modeli cybernetycznych jak najbliżej do energetyki. Dotyczy to wszystkich procesów od wytwarzania i aż do dystrybucji i zagospodarowania energii w różnych jej postaciach: chemicznej,

elektrycznej, mechanicznej, cieplnej etc. Teraz mówi się także o bioenergetyce, hydroenergetyce helioenergetyce, aeroenergetyce itp. I wszystko to w kontekście odnawialnych źródeł energii czyli w skrócie OZE. W tych zabawach semantycznych również musimy uwzględniać fizyczną stronę, zdefiniowanie energii ze strony fizyki. Przeprowadzić i jakościową ocenę energii, wiedząc że kalorii, Joli, kilowaty i konie mechaniczne na godzinę jak i same tylko elektron Wolty powiązane jednak są współczynnikami. One to mają inne znaczenie uwzględniając sposoby wydobywania surowców energii, magazynowania, oraz dla zarządzania energią. Rynek energii zazwyczaj jest najtrudniejszym. Każde prawo, w tym i międzynarodowe jest bezsilnym w łagodzeniu sporów energetycznych. One stają się coraz popularniejszymi w stosunkach pomiędzy państwami. Ostatni są związanymi liniowymi obiektami przesyłu energii i nie tylko liź rurociągami. Przy tym uwzględnić musimy kulturę i filozofie oraz podejścia prognostyczno-futurologiczne rynku energii. Cel konieczna, a można powiedzieć motto działań: „Jeżeli jest możliwość, to stworzyć autarkie energetyczną dla jakiegoś regionu, nawet dla oddzielnie wziętego technicznego obiektu. Modelowanie statyczne na podstawie danych statystycznych zawsze dają wtedy bardzo dobre wyniki!”. Modele autarkiczne, przykładowo dla zużycia energii, w przypadku nawet domku jednorodzinnego zrobić znacznie łatwiej, aniżeli dla osiedla, nie mówiąc już dla regionu. Do system otwartego z wielu wyjściami a jednym wyjściem lub wcale, mamy dobre modele fenomenologiczne oraz równania deterministyczne. Jest ze strony modelowania matematycznego dobrze opanowanym. Zidealizowanych systemów, natomiast, jest niewielu! Ponieważ mamy sprawy z finansami, a jest to nieuniknionym w gospodarce każdej, a nawet i w gospodarstwie prywatnym, to wielu faktorowy system otwarty jest trudny do modelowania prognostycznego nawet i wspomnianymi metodami matematyczno-komputerowymi. Nawet z zastosowaniem matematyki dyskretnej i logiki konstruktywnej. To dla

tęgo, mało kto dla prognostyki w energetyce na poważnie odbiera ekonometrię. Gdy fizycy rozkodowali nawet i kod DNA, to rozpoczęła się epoka cybernetycznej ekonomii. Ostatnia i jest tą drugą ławą fundamentową. Ma ona prawo, opierając się na matematykę dyskretną i stochastyczną probabilistykę, tworzyć modele prognostyczne ekologiczno-ekonomiczne. Raz lepiej a raz gorzej pracują te modele w warunkach sterowanego chaosu zaproponowanego na skale gospodarki światowej. Bóg-dolar nie jest tutaj zaradnym, jeszcze gorsze ma się inna waluta. Najboleśniej, gdy galopująca dewaluacja dotyka krajowej waluty, naszej ciężko zarobionej. Podobno, jak to miało miejsce z radzieckim rublem, ukraińską hrywną, czy teraz walutą wenezuelską. Ciężko jest zastosować modele fizyczne, przykładowo zasady termodynamiki do modelowania gospodarki, bo jak podaje literatura naukowa, opieramy się na wielkości urojone. Nie wiedząc co to jest energia nie możemy mówić o bilansie energetycznym kuli ziemskiej, a nawet i o autarkii energetycznej któregoś wielkiego państwa, tak nawet i naszego kraju. Aspekty metodologiczne w badaniach procesów społecznych opierają się na logikę rozmytą. Jako system otwarty, energetyka każdego kraju, może stosować tylko stochastyczny model bardzo przybliżony prognostyczny w celu przewidywania sytuacji na rynku, a także w życiu społecznym. W ostatnim znaczeniu, w odniesieniu do socjologii stosujemy dla modelowania, matematykę dyskretną. Opiera się ona na cybernetyczne podejście w tworzeniu modeli fenomenologicznych. Każdy model zarządzania finansami, nawet w stosunku do energetyki, jest niedoskonałym, bo jest tylko modelem bardzo skomplikowanego systemu. Przy tym tylko modelowanie komputerowe i jego weryfikacja empiryczna daje wiedzę na którą można się opierać, stosować w wyborze optymalnych dróg w praktyce i w życiu społeczno-gospodarczym. Instrumentem ma występować logika. Logika w rozumowaniu klasycznym, jako sztuka wnioskowania w teorii poznania naukowego świata, w tym i problemów ekologicznych oraz



energetycznych, opierająca się na matematykę klasyczną, też nie zdaje egzaminu w makroekonomii. Nie zdaje ona i egzaminu w fizyce kwantowej. Tak, ma racje chyba nawet najczęściej w krajowej fizyce, prof. Krzysztof Meisner na UW, gdy mówi otwartym tekstem, że na ćwierć wieku jest matematyka do tyłu od wymagań „kwantowców”. Słabość matematyki jest bardzo wyczuwalną. Nawet i w codziennym prognozie pogody. Dla tego, że każdy system otwarty, nawet i z jednym wyjściem trudny dla modelowania. Tylko autarkiczne (od autarkia) modele sektorów gospodarczych, przykładowo energetyki, mogą pomóc stosować modelowanie statyczne w bifurkacji finansowej i nawet gospodarczej, w warunkach gospodarki rynkowej. Co z mówić możemy o modelowaniu stanu makroekonomii. Co zaproponuje rynek surowców, cennych papierów? W gospodarce światowej, w tym i krajowej energetyce naukę prowadzą w sensie zarządzania do modeli sterowanego chaosu. Brak mądrych ekonomistów! Nie skoro pojawią się one w Polsce i na świecie. Ich „noblowanie” odbywa się w sposób tendencyjny, w towarzystwie wzajemnej adoracji i prowadzi to zagrożeń w aspekcie ekologii integralnej etc. W procesach globalnych, jak zmiana klimatu, kataklizmy związany z katastrofami i awariami różnego rodzaju w energetyce i załamania w ekonomii, bardzo ciężko jest poddać modelowaniu komputerowemu. Ucierpiało fiasko także i stosowanie podejść poważnej fizyki, głównie zasad i praw termodynamiki dla modelowania procesów społecznych. Logika trudno jest oszukiwać. Zresztą i logika-fizyka też oszukać trudniej w porównaniu do logika-filozofa czy filozofa-moralistę. Jak by to nie wyglądało paradoksalnie, zazwyczaj prawda, na parę z logiką, nie są wpuszczane do świetlicy nauki. Prawda jest tylko w siankach, nieraz zepchnięta do ciemnej piwnicy, a często nawet gdzieś tam na zadworzu. W formie klasycznej, w czasie komercjalizacji nauki, niestety często staje się ona zbędną. Alogiczność w fizyce staje się przy tym przerażającą. Logika rozmyta, wielowarstwowa i w innych postaciach podawana, staje się niestety dla nauk poważnych, szkodliwą. Tak jest z fizyką

kwantową i jądrową, ze współczesnymi kierunkami chemii, w dziedzinach ich powiązania z biologią, kosmosem itp. To dla tego kosmologia i astrofizyka to dwie wielkie różnicy, jak mówią logicy w Odessie. Również jak biofizyka tak i biochemia a także astrofizyka nie może oprzeć się na klasyczną matematykę. Nawet i mechanika ciała stałego w części poznawania deformacji plastycznych, zjawisk reologicznych, zjawisk powiązanych z dyssypacją energii nie może być spełni funkcjonalną. Każdy autor podręcznika z mechaniki kwantowej ma swoją fizykę i swoją chemie. Więc, dobrym jest powiedzenie lwowskich profesorów, że nikt z „kwantowców” na fizyce kwantowej się nie zna. To samo i z teorią plastyczności, hiperplastyczności, akustosprężystości itp. W czasach współczesnych, jeżeli ktoś z mądrych naukowców chce udowodnić że nowoczesna nauka jest częścią starej, to nie dostaje finansowania. Kiedyś w kontekście tego groteskowego rozważania, Hugo Steinhaus mądrze powiedział, że logika jest jedną z cech głupstwa. Na pewno że gdy by się obudził Arystoteles by dostał po tych słowach zawału serca. W tej że prace wybitny logik-matematyk, odkrywca Stefana Banacha mądrze doradzał, że rządzić jest trudno i dlatego mądrzy chętnie powierzają ten obowiązek głupim – dla nich nie ma trudności! Z „narodu wybranego” też nieraz mędrzy powstają, ale coraz większe z tym są kłopoty. Trudno teraz marzyć o pojawienie się Spinozy. Dla „oduraczania” „mędrców” społeczeństwa, jak trafnie mówi satyryk współczesny polski mecenas Stanisław Michalkiewicz, lepiej rozpoczynać akcie od wodza państwa. Jeżeli wodzowie mają zerową intuicję, to w Rwandzie lekko można było podzielić ludność na Hutu i Tut si. Jeżeli się ma nieuka w krześle przywódcy państwa europejskiego, to czemu tą metodę nie wykorzystać nawet i w Europie, idealnie w Ukrainie, a może się uda i w Polsce! Coś podobnego chcą „zmodelować”, opierając się na logikę „bardzo rozmytą”, teraz w Wielkiej Brytanii. Cameron ratując się w chaosie zaproponował wyjść y UE, zakłamana Teresa Maj nie potrafiła w tym polu i grze nic zmienić a Boris Jonson balansuje nad

przepaścią. Już w czasach starożytnych, intuicyjna złożoność podejmowania decyzji wymaga od wodza wiedzy z dziedziny logiki. Jego zdolności prognostyczne opierający się na doświadczenie życiowe, na wiedzę naukową, oraz intuicja genetyczna, wymagała jednak naukowego fundamentu dla codziennych skutecznych działań. Doświadczenie oraz intuicja. Na nich, jako na dwóch ławach fundamentu trzyma się mądrość przywódcy, a on formuje politykę państwa. W nauce używamy pojęcie intuicyjna złożoności. Ma ona wiele aspektów. Trudno ją określić i sformułować dokładnie. W logice formalnej często ograniczają się do złożoności obliczeniowej problemów, do modelowania procesów społecznych z zastosowaniem modeli termodynamiki etc. Z naszego punktu widzenia to jest zbyt ryzykownym przerzucanie i wieszanie obowiązków zarządcy na problemy komputera. Ma program i niech sam sobie operator liczy. Występuje problem dla obywateli jak oto: długie obliczenie i jednocześnie „kopanie w ogródku i rozmowa z naczelnikiem”. Wróćmy znowu do logiki. Skorzystajmy z niej w poszukiwaniu pomocy w zarządzaniu i podejmowania decyzji w zarządzaniu. Zaczniemy od tego, że logika powstała jako nauka o poprawnym wnioskowaniu. Rozwój tej nauki trwa ponad 2000 lat. W kolejnych wiekach znajdowano prawa logiki, metody wnioskowania. Ostatnie operatory logiczne stosowane w życiu naukowymi społecznym, zbadano dopiero niecały wiek temu. Na pierwszym miejscu w zarządzaniu małymi grupami ludzi a nawet i państwem, jak wiemy dobrze, jest prawo. Logika prostych zdań pomaga jemu przetrwać w środowisku chytrych polityków. Ostatnie mają, za określeniem Donalda Regana, zazwyczaj jako jedyną cel, być wybranym na powtórny termin. Mają one swoją własną logikę a nawet i całą filozofie dualizmu w polityce: jedno mówić, drugie myśleć. Robić jeszcze co innego potrafią! Politycy tworzą nie tylko zamieszanie, ale i chaos w nauce. W tym przypadku, nawet i logika klasyczna, jako metodologia i chleb nauk ścisłych, często bywa, niestety, bezradna! Przykro, że biurokracja nie pozwala uporządkować

dokumenty prawne, które mogli by poprawić stan nauki. Oczywiście większość producentów takich dokumentów mija się z logiką. Wcale im nie to nie szkodzi, a w większości przypadków pomaga w realizacji merkantylnych interesów. Dla opracowania masywów danych wziętych z życia społecznego, wymagany jest praktyczne stosowanie zasad teorii mnogości. Wtedy wchodzi w grę logika algebraiczna. Ona ma służyć do uporządkowania dowodów matematycznych. Polscy naukowcy wprowadzają do użytku logiki wielowartościowe. Przy tym większość przedstawicieli nauk społecznych i nawet prawników zapomina o logice prostych zdań. Ma miejsce hipotetyczność w prognostyce suwerenności energetycznej, finansowej itp. Przejaw zjawisk znanych, można by określić w uproszczeniu i w przybliżeniu jako obszar logicznej ignorancji. Ale znowu: logika to nauka o weryfikowania i falsyfikowania hipotez. Dalej rozwiniemy tą tezę wraz ze sposobami dowodzenia. Wprowadzimy pojęcie logiki zdaniowej. Zdania bywają różnego rodzaju – twierdzenia, pytania, rozkazy etc. Twierdzenia mogą być prawdziwe lub nieprawdziwy. Dla rozkazów i pytań określenie ich prawdziwości często nie ma sensu, bo one mogą określać czyny i obiekty. Z prostych zdań, w postaci stwierdzeń, możemy budować zdania złożone. Na przykład z powiedzenia „Pani kuje, a pan panikuje...”. Możemy rozumować, zastanawiać się, czy pan też czasem nie kuje pani? A może pan kuje dla pani kłaczki czy konia! Czy pani, daje zastrzyk, i czy pan jednocześnie też nie daje zastrzyk dla kotka czy pieska. Taka zabawa semantyczna wymaga prawidłowego podejścia w budowaniu konstrukcji syntaktycznych. Każdy język a nawet wymowa ma w tym przypadku swoją logikę. Takie same są łączniki (operacje) w algebrze boolowskiej, więc możemy ją zastosować do obliczania prawdziwości złożonych zdań. Formalna logika zdaniowa może być zalgorytmizowaną. Wtedy nadaje się ona jako instrument do opracowania wniosków i twierdzeń przy pomocy komputerów, bo języki dla

komputerów są najbardziej formalne. Prawa logiki zdaniowej, to są akurat te prawa, które pochodzą z określania koniunkcji. W tym przypadku musimy uwzględnić w instrumentariach metodologicznych podejście semantyczno-semiotyczne. Zwracając się znowu że do matematyka-logika Hugo Steinhausa, napotykamy się na jego stwierdzenie, że arystokracja wywodzi swe przywileje od pierwszego z rodu, tzn. od tego jedynego w linii, który nie urodził się arystokratą. Przyjmując pewne stwierdzenia za prawdziwe (na przykład tautologie) możemy przeprowadzić *dowody*. Idea dowodzenia jest oczywista – przekonać innych. Ponieważ każdy ma swoją rację i przekonania, to lepiej korzystać z nich w dowodach. Przyjmując te przekonania za prawdę (biorąc je jako hipotezy, stosujemy prawa logiki by wywnioskować, co z tych przekonań wynika. Oprócz tego przyjmuję się, że w każdym systemie przekonań są zawarte wszystkie tautologie jako „wspólny sens”. I tu jest pies pogrzebany! Dowodzimy to, co my chcemy, a nie to, co chce osoba przekonywana. Jeśli w jego przekonaniach jest sprzeczność, to stosujemy metodę dowodzenia *reductio ad absurdum* (sprowadzania do absurdu). Jak widać z implikacji z nieprawdy wynika zarówno prawda jak i nieprawda. Wystarczy tylko jedna sprzeczność by obalić całą teorię. W tym sensie logika zachowuje się jak śpiąca królewna – wystarczy zagryźć sprzeczność i od razu usypia na wieki. Jednak zdarza się, że jakiś Książę matematyki odgrzebie teorię, wytrząśnie z niej sprzeczność i przywróci do życia. Tak stało się w swoim czasie z teorią mnogości, kiedy odkryto w niej paradoksy. Jeden sposób na omijanie paradoksu. Swego czasu także i Russell zaproponował: podział na klasy i zbiory, przy czym dla klas niczego nie zakładamy. Ta sama idea jest w programowaniu obiektowym, gdzie domyślnie jest tylko jedna klasa; wszystkie inne są w rękach programisty (niech on sprawdza ich niesprzeczność, jeśli ją lubi).

## WNIOSKI I REKOMENDACJE

Aby przekonać musimy mieć bardzo przekonującą metodę przekonywania. Metodę używaną w logice opiera się na dwóch zasadach:

*zasada prostoty* – dowód ma być możliwie prosty;

*zasada składnikowa* – dowód ma opierać się na składnikach pojęć.

Oprócz tego przydałoby się aby dowodziliśmy prawdy z prawd. Praktyka wysegregowała następujący schemat: Z systemu przekonań (stwierdzenia przyjęte przez przekonywanego) wnioskujemy stwierdzenia, wynikające bezpośrednio za pomocy reguł wnioskowania typu „konkretyzacji” i może ona być syntaktyczna lub semantyczna. Mamy dwa rodzaje reguł: syntaktyczna i semantyczna. Warto także zwrócić uwagę na nazewnictwo w nauce. Niektóre formalne konstrukcje są naukami (jak algebra i geometria). Jednak że, jeśli do określania prawd w danej dziedzinie potrzebujemy logicznego wnioskowania (na przykład zachowanie programów zależy od formuł logicznych i poprawność ich działania dowodzimy logicznie), to jest teoria, jeśli wystarczy tylko rachunek (to znaczy wszystkie reguły są syntaktyczne), to jest nauka. Nauka o grafach, przykładowo, jest nauką typu kombinatorycznego, nauka o prawdopodobieństwach. Wreszcie jest to tylko teorią, bo zdarzenia określamy warunkiem. Faktem jest że logika zdaniowa ma swoje miejsce w algebrze Boole’a. Rozumowanie logiczne nad predykatami przyprowadza nas do Demokrytesa. Struktura atomów jest niepodzielna. Taka jest zasada atomizmu Demokrytesa. Jednak w tradycji hinduizmu dochodzimy do wniosku, że tylko pustka jest niepodzielna.

Dla tego aby mówić logicznie o algebrach, w szczególności o prawach arytmetyki i różnych jej rozszerzeniach potrzebujemy bardziej rozbudowanego języka. Na pierwszym miejscu jest język wyrazów nazywany w literaturze również *termami*. W tym języku dodajemy nazwy dla zmiennych, więc elementy metajęzyka algebry. Język

logiki predykatów pozwala mówić nie tylko o pojedynczych obiektach, ale i o prostych klasach obiektów. Jak zauważył P. Aczel, kwantyfikatory ogólny odpowiada klasie wszystkich obiektów, kwantyfikator egzystencjalny odpowiada klasie wszystkich niepustych klas obiektów. Faktem jest, że logika predykatów ma swój model w arytmetyce. Ze wszystkich funkcji boolowskich formalnie będziemy używać tylko koniunkcja, alternatywa i negacja. Przy rozumowaniu naokoło logiki wyższych rzędów, powiedzieć musimy, że logika zdaniowa szuka prawdy w klasie prostych zdań. Aksjomaty takiej logiki otrzymamy przez dodawanie aksjomatów dla nowych formuł do już określonych aksjomatów dla logiki zdaniowej. Omawiając logikę drugiego i wyższych rzędów, uwzględniamy, że tym samym sposobem, jak i w logice pierwszego rzędu możemy konstruować logiki wyższego rzędu. Jeśli w logice pierwszego rzędu mamy kwantyfikatory nad klasą zmiennych, to w logice drugiego rzędu dodajemy kwantyfikatory nad relacjami (funkcjami). To znaczy, że zbieramy do kupy nie tylko wszystkie obiekty, ale wszystkie podzbiory wszystkich obiektów. Wśród wszystkich możliwych relacji znajduje się i klasa wszystkich możliwych zbiorów składających się z obiektów. Jest to drugi poziom generalizacji, więc naturalnie jest nazwać taką logikę „drugiego rzędu”. Niestety dla logiki drugiego rzędu nie istnieje aksjomatyzacja. Rachunek prawd tej logiki nie może być zautomatyzowany. Przechodząc do rozumowania naokoło logiki wielowartościowej, opierając się na stwierdzenie Flaszena, że każdy absurd ma swoją logikę, widzimy jak kolorową, a nie czarnobiałą jest logika! Pomiędzy prawdą a fałszem często pojawia się i trzecia wartość logiczna.

### LITERATURA

1. **G. Boole, 1854.** An Investigation of the Laws of Thought. On Which Are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities. Walton&Maberly, London.
2. **H. Garcia-Molina, J. Ullman, J. Widow, 2006.** Systemy baz danych. PWN, Warszawa.

3. **Hilbert.** Grundlagen der Geometrie. Leipzig.
4. **L. Kropiwnicki, S. Radev, 2006.** Wieloagentowe systemy podejmowania decyzji, Telecotron International, Warszawa.
5. **K. Kuratowski, A. Mostowski, 1952.** Teoria mnogości, Monografie matematyczne tom XXVII, Warszawa.
6. **Beata Padlewska, Slavian Radev, 1999.** Informatyka teoretyczna (modele i zadania). Telecotron, Warszawa.
7. **S. Radev, 2010.** Logika i matematyka dyskretna „Collegium Mazovia”, monografia. Siedlce, 177.
8. **Helena Rasiowa, 1968.** Wstęp do matematyki współczesnej, PWN, Warszawa.
9. **Webster’s Seventh New Collegiate Dictionary, G.&C, 1976.** Merriam Company Springfield, Mass.
10. **L. Wittgenstein, 1961.** Tractatus logico-philosophicus. Routledge&Kegan, London.
11. **W. Wysoczański, 2018.** Polakożerczość w nauce wynik jej upolitycznienia. Warszawa.
12. **Walery Wysoczański, Stanisław Fic, 2017.** Bezpieczeństwo ekologiczne oraz niezawodność ó eksploatacyjna obiektów budowlanych na terenach poddanych wpływom osuwisk. Underwater Technologies, Iss.06, 74-81.
13. **Walery Wysoczański, 2020.** Петиція керівному комітету конференції з питань Laudato Si: Збереження нашого спільного дому та майбутнього життя на Землі. Transfer of Innovative Technologies, Vol.03, No.1, 124-126.

### REFERENCES

1. **G. Boole, 1854.** An Investigation of the Laws of Thought. On Which Are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities. Walton & Maberly, London.
2. **H. Garcia-Molina, J. Ullman, J. Widow, 2006.** Database systems. PWN, Warsaw.
3. **Hilbert.** Grundlagen der Geometrie. Leipzig.
4. **L. Kropiwnicki, S. Radev, 2006.** Multi-agent decision-making systems, Telecotron International, Warsaw.
5. **K. Kuratowski, A. Mostowski, 1952.** Set theory, Mathematical Monographs, Vol.XXVII, Warsaw.
6. **Beata Padlewska, Slavian Radev, 1999.** Theoretical computer science (models and tasks). Telecotron, Warsaw.

7. **S. Radev, 2010.** Discrete logic and mathematics, Collegium Mazovia, monograph. Wloclawek, 177.
8. **Helena Rasiowa, 1968.** Introduction to contemporary mathematics, PWN, Warsaw.
9. **Webster's Seventh New Collegiate Dictionary, G. & C, 1976.** Merriam Company Springfield, Mass.
10. **L. Wittgenstein, 1961.** Tractatus logico-philosophicus. Routledge & Kegan, London.
11. **W. Wysoczański, 2018.** Pole-eatingism in science as a result of its politicization. Warsaw.
12. **Walery Wysoczanski, Stanislaw Fic, 2017.** Ecological safety and operational reliability of buildings in landslide affected areas.
13. **Walery Wysoczanski, 2020.** Petition to the Steering Committee of the Conference on Laudato Si: Saving our common home and the future of Life on Earth. Transfer of Innovative Technologies, Vol.03, No.1, 124-126 (in Ukraina).

### Cybernetic and economic mathematical models of energy autarky in the context of integral ecology tasks

*Walery Wysoczański, Slavian Radev*

**Abstract.** At the beginning of the creation of science, philosophers also tried to define life itself and the product of its evolution, i.e. man. The cybernetic definition of life is considered one of the best because it is above religions. Of all the religions of the world, physics is "the most religious," and again, on the other hand, empirical physics in tandem with experimental chemistry is the most anti-religious. Integral ecology is this good straight path of a methodological approach to solving problems and technological failures. Among all possible relations there is and the class of all possible sets consisting of objects. Unfortunately, there is no axiomatization for second-order logic. The calculation of the truths of this logic cannot be automated. Moving on to reasoning around multi-valued logic, based on Flaszen's statement that every absurdity has its own logic, we see how colorful, not black and white logic is! A third logical value often appears between true and false. Nature, its conditions cause the manifestation of evolution. It is still difficult for philosophers to say where it comes from, they even say that it comes from outer space, then a lot of mysteries where it comes from, even on nearby planets? This is why social life is under the

constant scrutiny of not only philosophers, but also physicists, biophysicists, chemists, etc. They try to establish their views on changes in the state of the Earth, on the appearance of proteins, living organisms. At the same time, some physicists build thermodynamic models to characterize entropy and negentropy and their role in evolution, and then the role of negentropy in generating revolutions and wars. This is another utopia and just as communism or capitalism are anti-human. Communist theories and most other theories fail. In order to develop massifs of data taken from social life, the practical application of the principles of set theory is required. This is where algebraic logic comes into play. It is used to organize mathematical proofs. Polish scientists implement multi-valued logics. At the same time, most representatives of social sciences and even lawyers forget about the logic of simple sentences. There is a hypothetical factor in the prognosis of energy and financial sovereignty, etc. The manifestation of known phenomena can be described in simplification and roughly as an area of logical ignorance. But again: logic is the science of verifying and falsifying hypotheses. We will develop this thesis further along with the methods of proving. We will introduce the concept of propositional logic. Sentences can be of various types - statements, questions, orders, etc. Claims may be true or untrue. For commands and questions, determining their truthfulness often does not make sense, because they can define actions and objects. Only autarkic models of economic sectors, for example energy, can help to apply static modeling in financial and even economic bifurcation, in the conditions of a market economy. What can we say about modeling the state of macroeconomics.

**Keywords:** integral ecology, energy, information, social life, model, empirical physics, electron, experiment, math school, cybernetics, predicted, modeling, logical value.

### BIOGRAMY AUTORÓW

**Walery Wysoczański** (Warszawa, Polska) – doktor nauk technicznych. Pracę doktorską obronił w Moskwie (styczeń, 1992). Praca naukowa dotycząca niezawodności eksploatacyjnej rurociągów nominowana została do najwyższej nagrody państwowej (1987). Za dorobek naukowy, dotyczący OZE, nominowany został Członkiem Akademii Cybernetyki Ekonomicznej. Wykłady od 1981 r. prowadzi na nauczaniach wyższych w

kraju a przed tym za granicą. Autor wielu artykułów, podręczników, monografii, kilku tomów prozy naukowo-publicystycznej w różnych językach, poezji.

**Slavian Radev** (Sofia, Bułgaria) – doktor nauk matematycznych. Obronił pracę doktorską w Warszawie (styczeń, 1982). Senior research fellow, associated member in Mathematical Linguistic section in Institute of Mathematics and Informatics of Bulgarian Academy of Science. Reprezentant słynnej szkoły matematyków-logików warszawskich. Autor wielu publikacji, monografii opracowań metodycznych dla Szkół Wyższych Polski, Bułgarii i t.d. dotyczących matematyki dyskretnej oraz logiki konstruktywnej.

## Условия функционирования и оценка донного фона глубоководных аппаратов

Михаил Сукач

Киевский национальный университет строительства и архитектуры  
Воздухофлотский просп. 31, Киев, Украина, 03037  
msukach@ua.fm, orcid.org/0000-0003-0485-4073

Получено 05.07.2021, принято после просмотра 09.09.2021  
<https://doi.org/10.32347/uwt2021.11.1301>

**Аннотация.** Создание конкурентоспособных глубоководных грунторазрабатывающих машин и комплексов позволяет перейти к освоению месторождений полиметаллических конкреций и металлоносных илов, добыче песка и сапропелей с дна моря, обеспечивая таким образом паритетный доступ к минерально-сырьевым и энергетическим ресурсам Мирового океана. Цель работы – создание методов и технических средств для определения прочностных характеристик донных грунтов в поверхностном слое, направленных на сокращение сроков создания и эффективное применение машин путем обеспечения соответствия их параметров реальным условиям эксплуатации.

Обычно свойства глубоководного грунта в естественном залегании (*in situ*) определяют по данным фото- и геоакустического зондирования или по поднятым с морского дна на поверхность кернам, а рабочие нагрузки машин, сопротивление грунта разрушению и другие механические характеристики оценивают на основе полученных геологическими способами данных. Новые методы и устройства точечного и непрерывного опробования дна, адекватно применяемые как на поверхности, так и под водой обеспечивают достаточную для практического использования достоверность получаемой информации. Задачами исследования являются обоснование теории гравитационного зондирования подводных грунтов и их резания, определение деформационно-прочностных свойств поверхностного слоя морского дна, сопротивления механическому разрушению и характеристик взаимодействия механизмов машин с илистым грунтом.



**Михаил Сукач**  
профессор кафедры  
строительных машин  
д.т.н., проф.

Новизной выполненной работы является установление особенностей взаимодействия рабочих органов и ходовой части землеройных машин с подводными вязкопластичными грунтами в зависимости от параметров рабочего процесса, прочностных свойств грунта, характеристик динамического нагружения и геофотопрофилирования подводных трасс. Практическое значение заключается в обосновании эксплуатационных нагрузок глубоководных землеройных машин; оценке характеристик донных грунтов в естественном залегании, а также комплексном исследовании донных массивов, позволяющих сократить число станций пробоотбора, общую трудоемкость рейсовых работ, установить эксплуатационный донный фон и оптимальные трассы добычных систем.

**Ключевые слова:** гравитационное зондирование грунта, сопротивление резанию, геостатическое давление, грунторазрабатывающая машина, рабочие нагрузки, донный фон.

### ВВЕДЕНИЕ

Создание новой подводной землеройной техники для очистных и добычных работ под водой обусловило детальное изучение

разрабатываемых массивов и рабочих процессов машин. Донные грунты и осадки в силу специфики залегания и воздействия водной среды не имеют аналогов на суше, существенно отличается характер взаимодействия с ними рабочего оборудования машин [1, 2].

Тем не менее, рабочие процессы землеройных машин на подводных, и особенно глубоководных грунтах, изучены крайне мало. Несовершенны методология и техническая база для исследуемых донных осадков и характеристик взаимодействия с ними механизмов машин.

Создание комплекса методов и технических средств определения свойств донных грунтов и сопротивления их разработке имеет важное значение для обеспечения паритетного доступа государств к минерально-сырьевым и энергетическим ресурсам Мирового океана; позволяет заблаговременно (на предпроектных этапах) определять эксплуатационные характеристики дна акваторий, специфику разрушения подводных грунтов и ожидаемые нагрузки машин в конкретных горно-геологических условиях [3 – 5].

### УСЛОВИЯ РАБОТЫ ГЛУБОКОВОДНОЙ ТЕХНИКИ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДОННЫХ ГРУНТОВ

В этой связи в первую очередь интересует верхняя (приповерхностная) часть грунтового массива (Рис. 1), в которой реализуются рабочие и тяговые характеристики глубоководных грунторазрабатывающих машин (ГГРМ). Имеются принципиальные особенности взаимодействия рабочих органов и движителей машин с подводными вязкопластичными грунтами [6, 7]. Как правило, сопротивление резанию таких сред исследуют моделированием рабочих процессов в барокамерах, т.е. при нагружении образцов гидростатическим давлением, в то время как при подъеме с глубины они претерпевают обратные изменения [8]. Выводы делают для давлений, обычно не превышающих 3 МПа (300 м глубины).

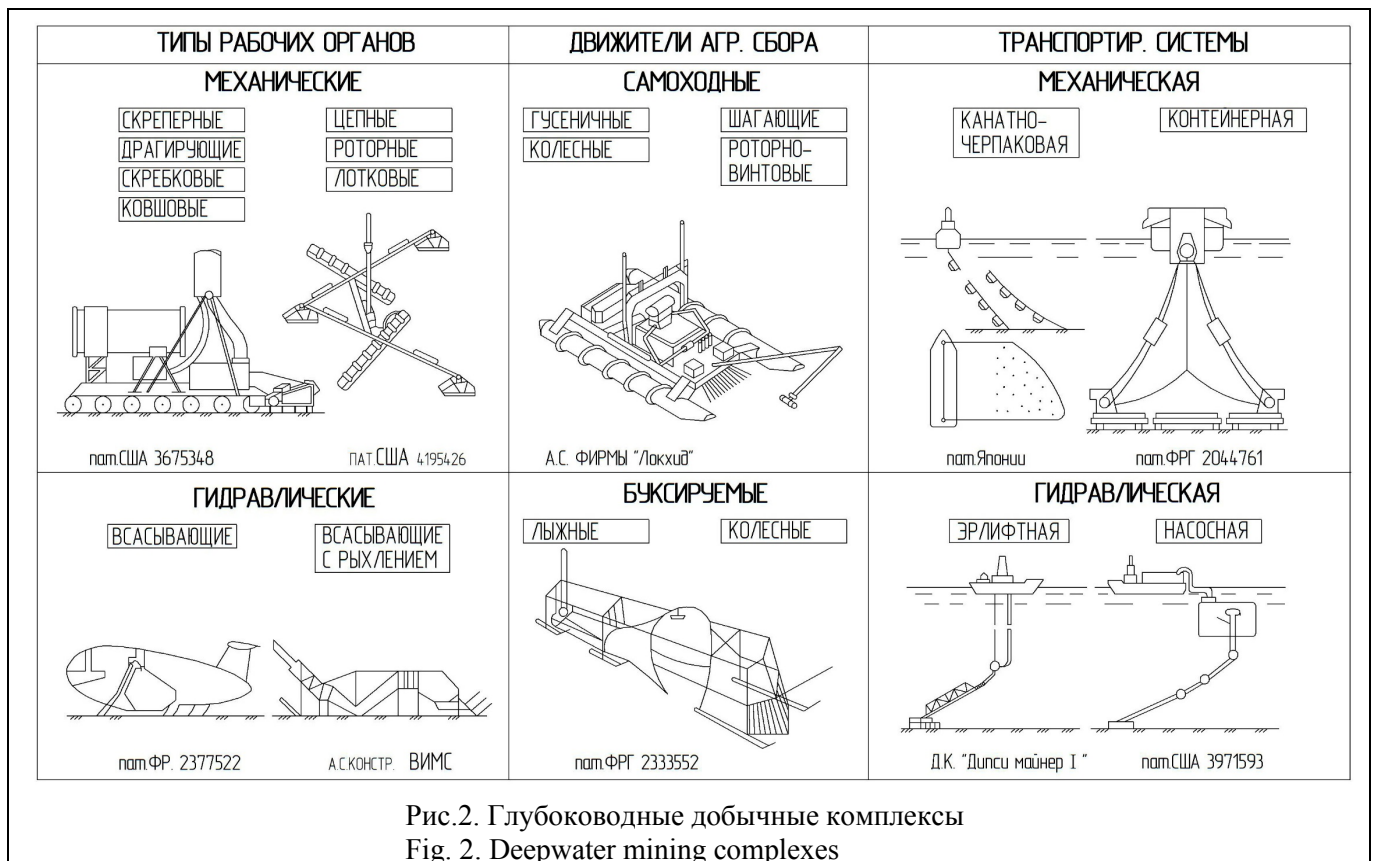
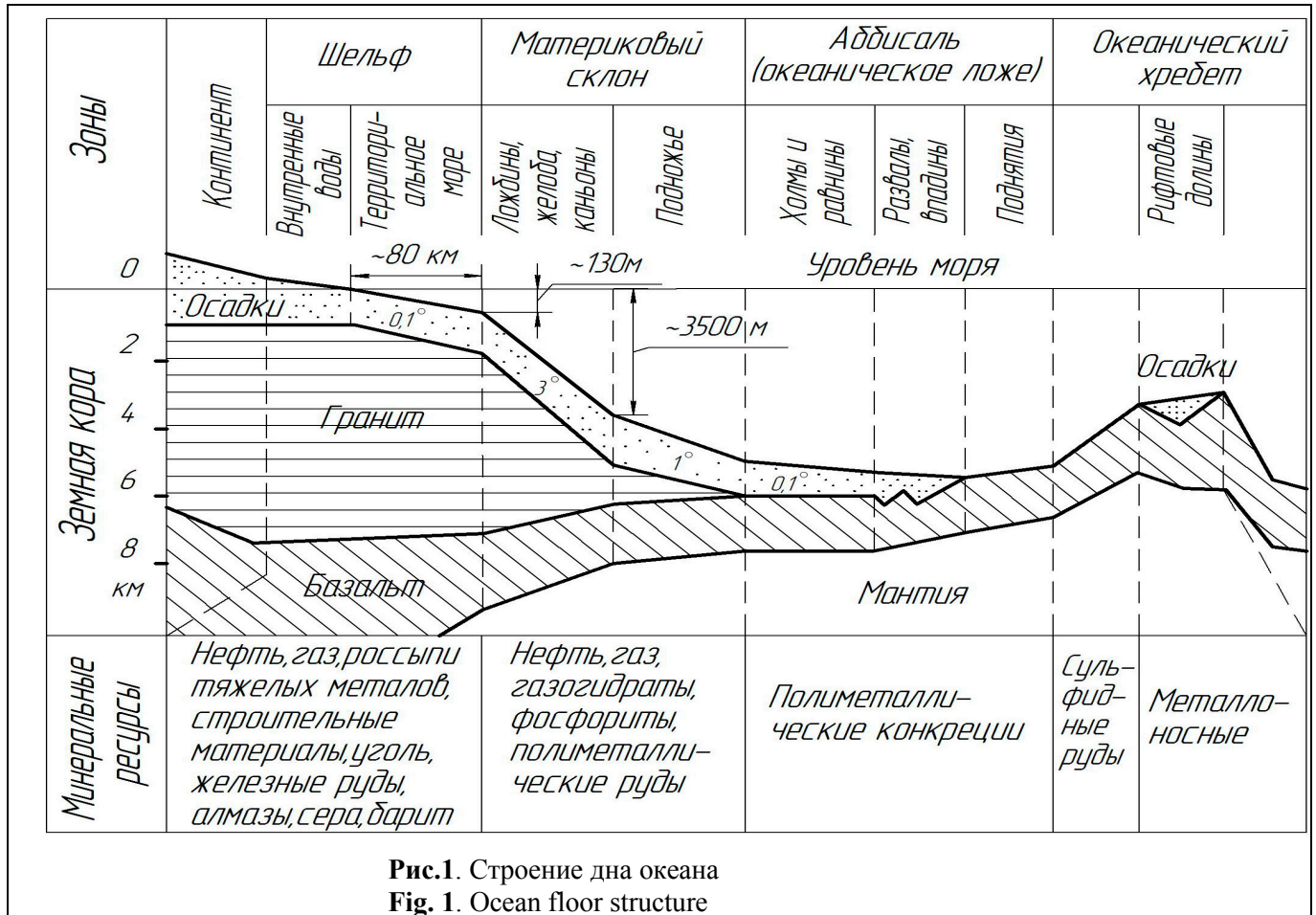
Исследования, проведенные в Украине и за рубежом показывают, что из всего комплекса характеристик только относительно небольшое их число непосредственно участвуют в формировании рабочих нагрузок (Рис. 2). На слабых водонасыщенных грунтах это – сцепление, угол внутреннего трения, плотность, динамическая вязкость. Кроме того, для составления проекта подводных работ необходимо знание несущей способности и батиметрических данных, показывающих изменение рельефа дна, основные его особенности (топкие места, выходы коренных пород и т.п.), высоту столба воды над грунтом [9].

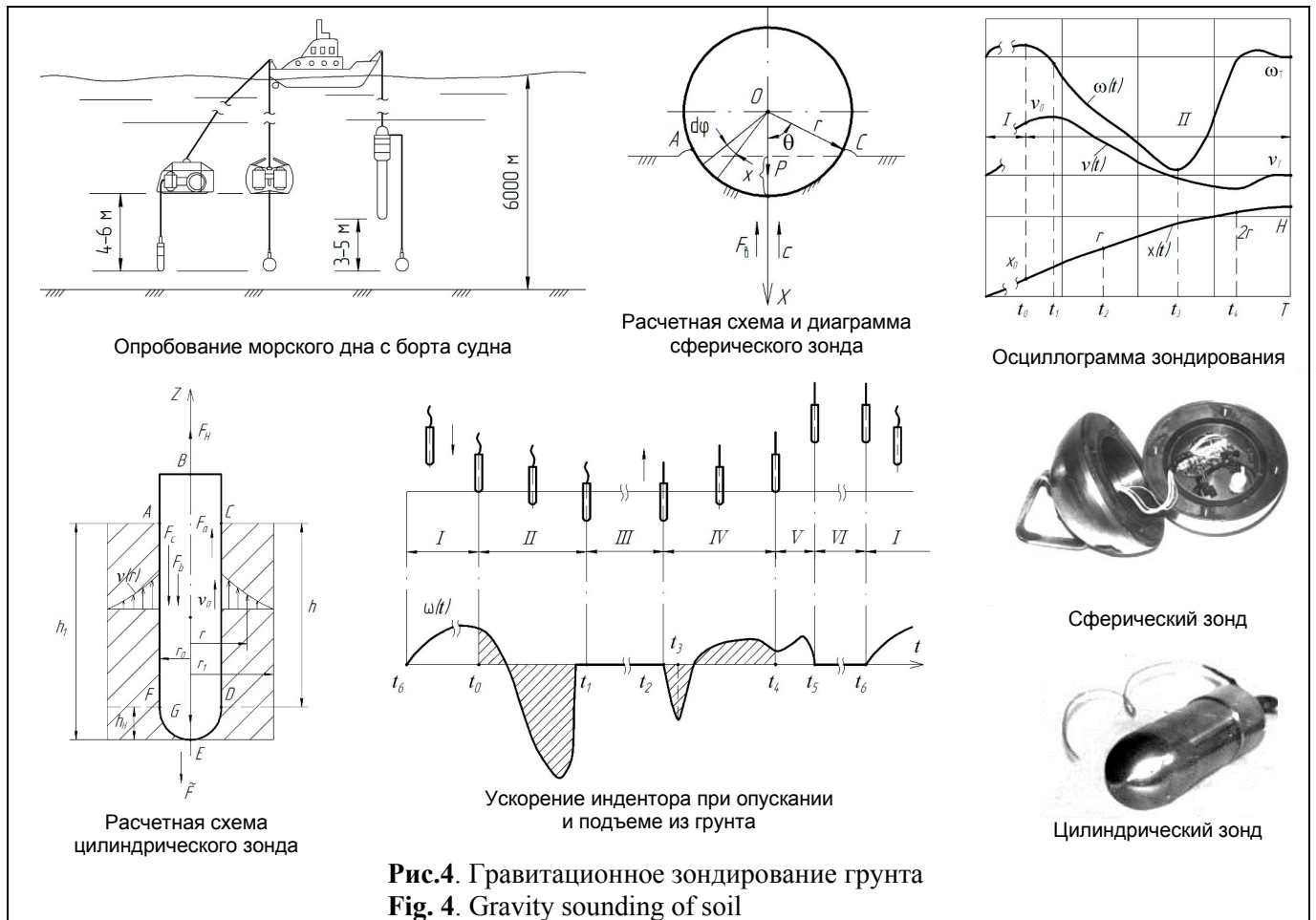
Известные технические трудности не позволяют проводить полномасштабные эксперименты на большой глубине, хотя и есть отдельные попытки измерения силовых параметров на опытных образцах исследовательской и добычной техники, работающей на глубине до 6000 м.

Поэтому представляется практически единственной возможностью в максимальной степени приблизиться к реальным эксплуатационным условиям на морском дне посредством создания контактных методов исследования свойств глубоководных грунтов на месте залегания, которые были бы адекватными как в подводных, так и обычных (атмосферных) условиях [10].

Обзор методов и устройств исследования грунтов в экстремальных условиях (Рис. 3) позволил установить, что наиболее оперативным и технически приемлемым на глубине является гравитационное зондирование дна, которое заключается в оценке прочности грунта по количеству ударов, глубине погружения или совпадению ударных импульсов индентора в натуре и на грунтах-аналогах. Аналитического описания этого метода нет. Кроме того, известные контактные методы позволяют получать только дискретные характеристики дна, а сопротивление разрушению грунтов определяют по образцам, поднятым с глубины [11]. Отсутствие достоверных данных о прочностных свойствах глубоководных







грунтов приводит к несоответствию параметров грунторазрабатывающих машин реальным условиям эксплуатации.

Цель исследования – разработка методов и технических средств для определения прочностных характеристик донных массивов, направленных на сокращение сроков создания ГГРМ и их эффективное применение путем обеспечения соответствия параметров машин реальным условиям эксплуатации.

Идея работы заключается в том, что характеристики донных массивов определяют в естественном залегании, а рабочие нагрузки машин – на основе полученных свойств, критериальных зависимостей сопротивления грунта, данных фото- и геоакустического зондирования дна. Принципиально идея реализуется путем создания устройств точечного и непрерывного исследования грунта, адекватно применяемых как в атмосферных условиях, так и под водой, и обеспечивающих достижение для практического использования достоверность получаемой информации.

#### ГРАВИТАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОРСКОГО ДНА

Предлагаются новые методы и модели гравитационного зондирования, позволяющие установить аналитические зависимости между деформационно-прочностными свойствами грунта и динамикой торможения в нем цилиндрического и сферического инденторов [12]. При этом отпадает необходимость в предварительном исследовании грунтов-аналогов, моделировании среды, гидростатического давления, использования расчетных коэффициентов (Рис. 4).

1) Поверхностный слой грунта, вмещающего добываемые железомарганцевые конкреции, представляет собой вязкопластичную несжимаемую однородную среду (реологическая модель Бингама-Шведова). Движение индентора в грунте считается относительно медленным (по сравнению со скоростью распространения упругих волн) и квазистационарным [13].

Цилиндрический зонд снабжают датчиками ускорения и натяжения подвески и проводят *несколько* опробований. Уравнение движения зонда построено на основе общих уравнений динамики сплошной среды. С учетом краевых условий и реологического уравнения вязко-пластичного тела, получают соотношение зоны деформации к радиусу зонда. По диаграмме ускорения и уравнению предельного состояния грунта при подъеме зонда, находят его сцепление  $\tau_0$  и вязкость  $\mu$ .

2) При пенетрации грунта сферическим индентором характеристики среды получают по результатам *одного удара*. Отличие этой модели от известного решения Стокса о погружении стального шара с постоянной скоростью в идеальную вязкую жидкость заключается в том, что рассматривается грунтовая среда, обладающая не только вязкостью, но и сцеплением, а скорость индентора переменная.

Сила сопротивления движению зонда в грунте включает составляющую  $F_v$  (пропорциональную вязкости грунта, скорости индентора) и составляющую  $F_c$  (пропорциональную напряжению сдвига, не зависящую от скорости). Интегральные значения  $\mu$  и  $\tau_0$  определяют в слое грунта, не превышающем диаметр шара. Скорость движения зонда находят путем интегрирования исходного графика ускорения в обр. направлении, начиная с момента остановки зонда  $T$ , где известны граничные условия, до момента его вхождения в грунт  $t_0$ . Используя уравнение движения сферического зонда, по минимуму квадратичного функционала находят вязкость и сцепление грунта.

В более общем случае (на большей глубине) характеристики грунта получают из условия  $\min(x, 2r)$ , где принимается минимальное значение из двух величин (глубины проникания  $x$  или диаметра сферы  $2r$ ).

#### СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕЗАНИЮ ДОННЫХ ГРУНТОВ

Теория рабочего процесса базируется на известных законах динамики сплошной

среды, методах подобия и математической статистики. Специфика разработки донных осадков заключается в наличии водной среды, гидростатическом давлении, повышенном сопротивлении грунта вязкому трению на рабочем инструменте и механизм машины, малых значениях сцепления и несущей способности грунта [14, 15]. В качестве исходных данных используются деформационно-прочностные свойства подводного грунта, полученные в условиях естественного залегания и параметров рабочего процесса машин (Рис. 5).

1) Рассматривается поступательное движение широкого плоского ножа прямоугольной формы; процесс резания стационарный, скорость перемещения ножа постоянна; продольный размер зоны деформации грунта вдоль ножа не изменяется; решается плоская задача.

Модель сопротивления подводного грунта основана на использовании уравнения динамики несжимаемой жидкости, условия неразрывности и реологического уравнения вязко-пластичной среды. С учетом краевых условий и теоремы о сохранении потока масс грунта, движущейся вдоль ножа, получены критерии подобия процесса резания, связывающие свойства грунта (вязкость  $\mu$ , сцепление  $\tau_0$ ), фазовое состояние грунта перед лобовой гранью ножа, его геометрические параметры, скорость и глубину резания [16].

2) Установлено, что сила сопротивления грунта  $F$  является суммой трех слагаемых, где первое определяется трением грунта по ножу; второе – давлением, третье – силой тяжести грунта и воды. Сопротивление подводного грунта не зависит от гидростатического давления, а определяется только параметрами процесса резания и свойствами грунта, который находится непосредственно на месте эксплуатации землеройной машины.

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОЧИХ НАГРУЗОК МАШИН

Сложности испытания грунтов на максимальных глубинах, большие материаль-

ные и временные затраты обусловили создание новых методов и технических средств, комплексное их использование и адаптацию к существующим технологиям глубоководных исследований [17, 18]. Для определения деформационно-прочностных характеристик и сопротивления подводных грунтов автором создан ряд устройств, установок и приборов для применения на глубине до 6500 м, а также в судовых и береговых лабораториях (Рис. 6). Это:

- *глубоководные пробоотборники трубчатого и грейферного типов* для взятия образцов донного грунта (Рис. 7);

- *различные модификации гравитационных зондов* (цилиндрической и сферической формы, тензометрические и снабженные пьезоакселерометрами, с аналоговой и цифровой регистрацией сигналов) для измерения сцепления, вязкости, несущей способности, диссипации грунта на месте залегания (см. Рис. 4, 7);

- *приборы регистрации и обработки импульсов зондов;*

- *судовые геотехнические модули* для определения сопротивления резанию, вращательного среза, липкости, изучения литологии и других характеристик донных грунтов (см. Рис. 5);

- *компенсационная подвеска моделей рабочих органов*, исключающая погрешности измерений при качке судна;

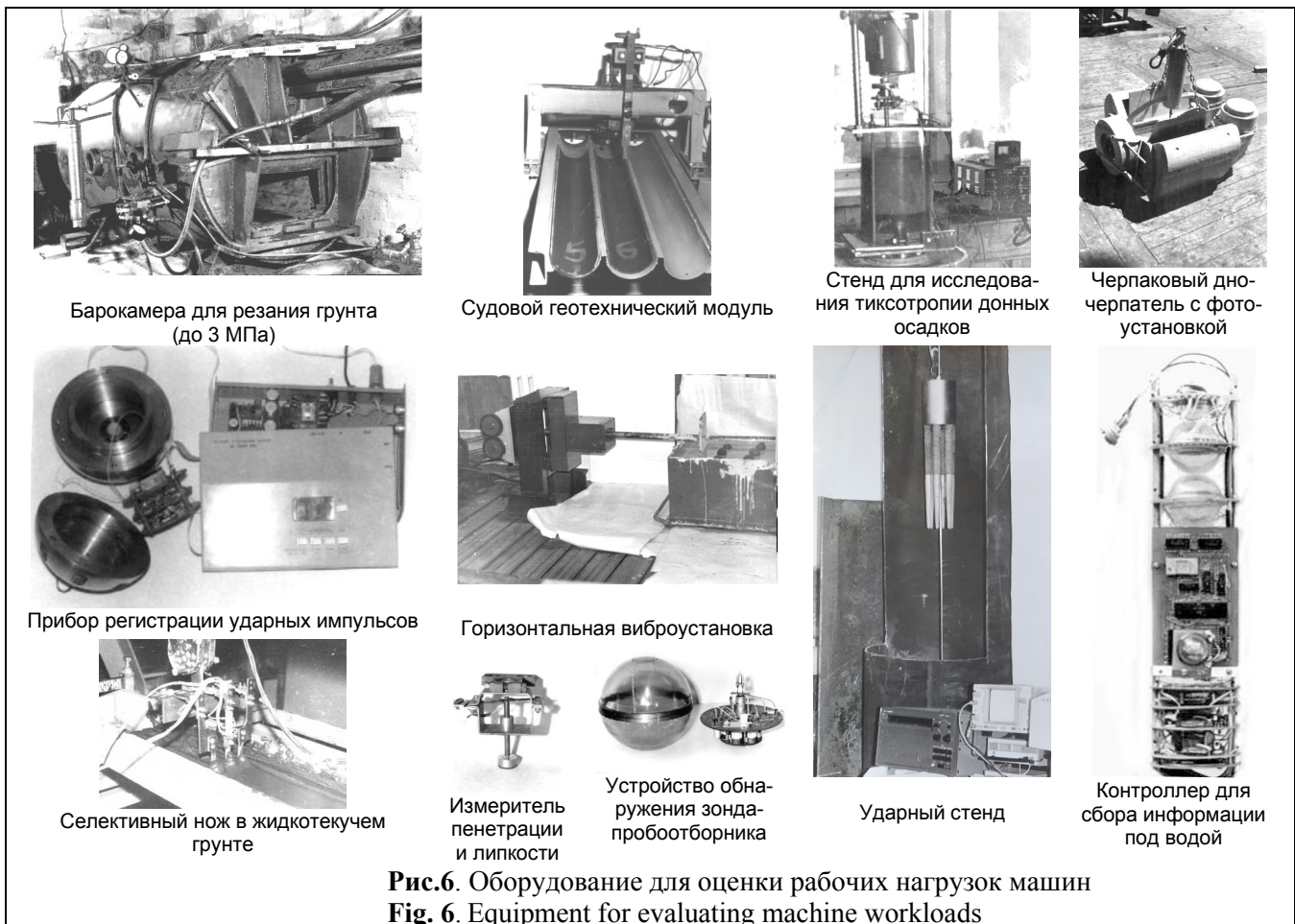
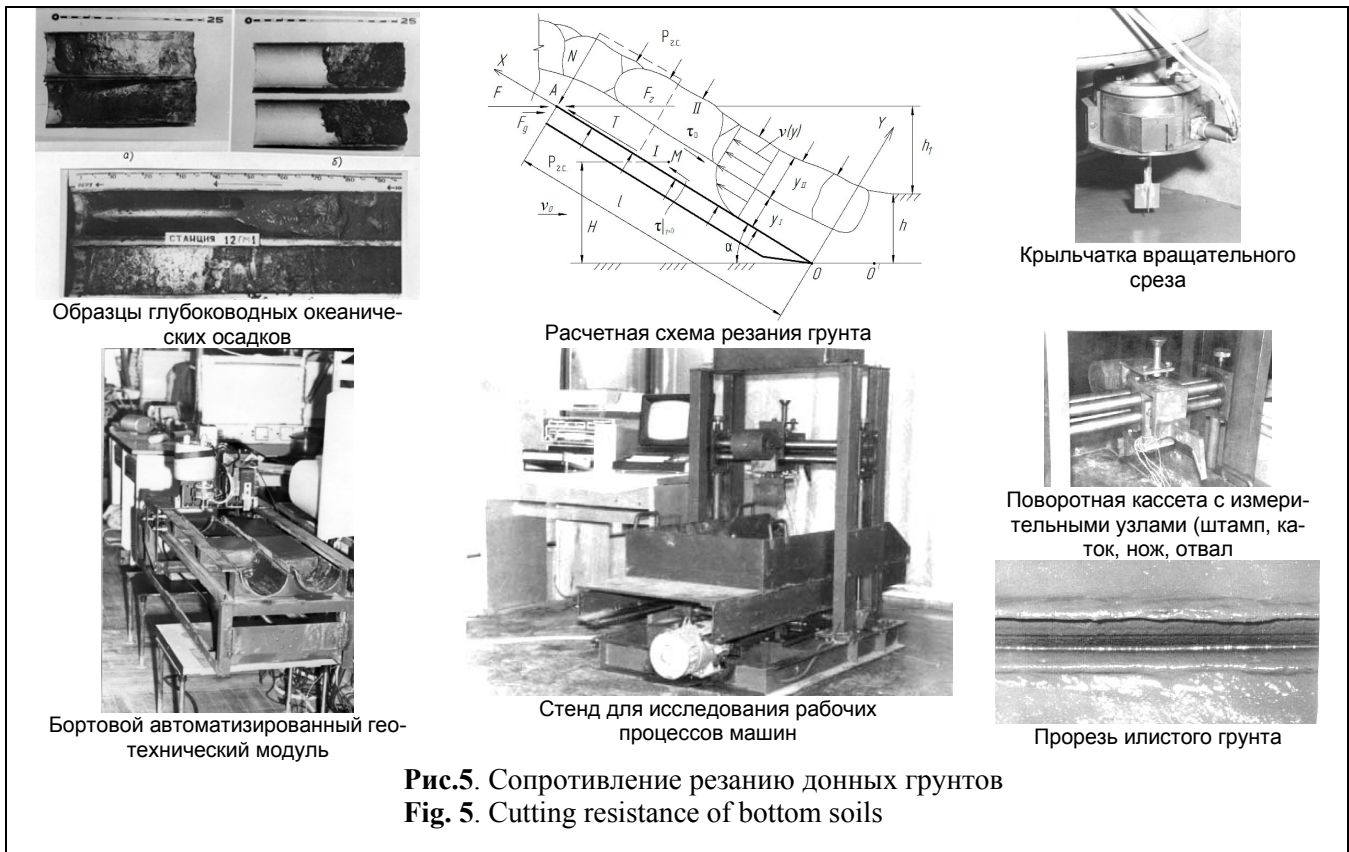
- *автоматизированный комплекс* для исследования рабочих процессов землеройных, строительных и дорожных машин (см. Рис. 5);

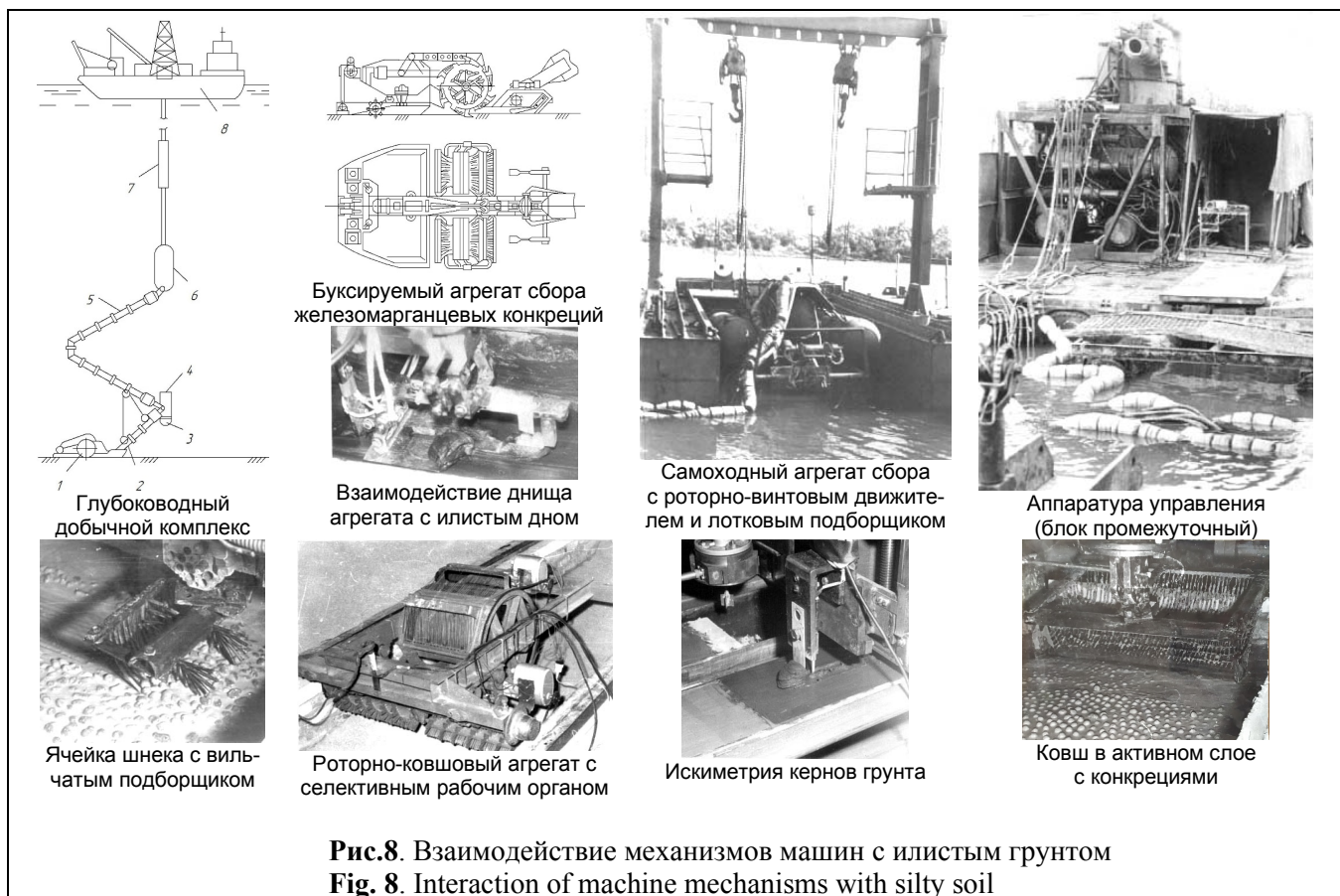
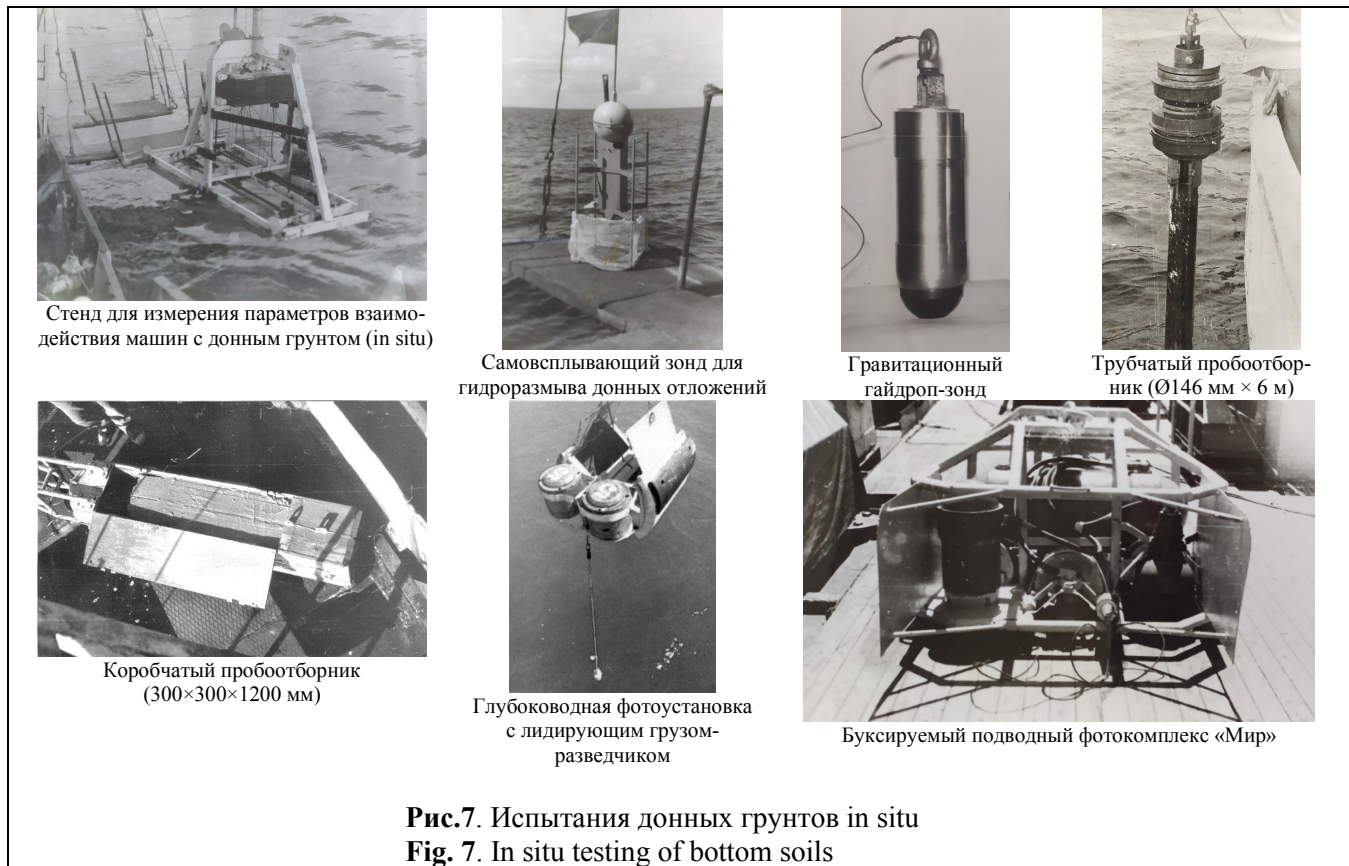
- *автономные и стационарные устройства и приборы* для сбора, хранения, передачи и обработки технологических параметров подводных машин;

- *глубоководные тензометрические зонды* (см. Рис. 4, 7);

- *автономное устройство* с цифровой регистрацией сигналов для комплектации подводных носителей, контактирующих с дном;

- *искиметры*, предназначенные для использования в системах автономного управления ГГРМ (Рис. 6 – 8) и др.





С помощью этого оборудования могут быть проведены испытания: в стационарных береговых лабораториях с использованием монолитов условно ненарушенного донного грунта; в судовых лабораториях по образцам грунта, поднятым с глубины; на натуральных подводных грунтах во время научно-производственных рейсов.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЗМОВ МАШИН С ИЛИСТЫМ ГРУНТОМ

Установлены закономерности *сопротивления перемещению днища буксируемого агрегата* по илу в зависимости от его прочности, величины давления со стороны машины и характера нагружения опорной части, которые могут возникать в процессе добычи (см. Рис. 8).

1) Оценено *влияние вибрации машины* на тиксотропные грунты с включениями конкреций (см. Рис. 6). *Параметры гидроразмыва* отложений исследованы в акватории Рижского залива (см. Рис. 7), даны сравнительные оценки эффективности их разработки гидравлическим и механическим способами. Полученные данные позволили полнее учесть специфику разработки океанического дна и повысить надежность эксплуатации добычной установки.

2) В морских полигонных исследованиях, проведенных совместно с СКБ ТМГР (Мурманск) и НИПИОкеанмаш (Днепр), отработаны функциональные возможности *самоходного агрегата сбора ЖМК* с лотковым рабочим органом и роторно-винтовым двигателем [19, 20]. При этом контролировали силовые характеристики на рабочем органе и двигателях, усилие буксирования, параметры эрлифтной системы подъема и др. (см. Рис. 8).

Полученные данные использовали в НИИ строительно-дорожной и инженерной техники (Киев) при разработке *эрлифтно-землеройного комплекса* для добычи сапропелей и плавучей установки с *буксируемым илосборщиком* скреперного типа для очистки водоемов от радиоактивных загрязнений [21, 22].

### ИСПЫТАНИЯ ДОННЫХ ГРУНТОВ IN SITU

Экспериментальные исследования проведены на донных грунтах в стационарных лабораториях, в условиях морских испытательных полигонов (Лиепая, Керчь, Геленджик, Новороссийск) и с бортов НИС «Янтарь», «Геленджик», «XVII съезд профсоюзов» во время опытно-производственных рейсов. Для контроля регистрирующей аппаратуры использовали *ударный стенд копрового типа* (см. Рис. 6). Метрологические испытания проведены с помощью *приборов фирмы Брюль и Кьер* (Дания). Свойства грунта контролировали *ротационным вискозиметром Rheotest-2*, цилиндрической крыльчаткой, штампами и другими стандартными методами (см. Рис. 5, 6). Динамическую прочность оценивали по контактному напряжению под сферическим штампом и величине диссипации грунта (количеству энергии, затраченной на его деформацию).

Морские испытания, проведенные на донных грунтах Черного, Балтийского морей и Тихого океана, показали, что их свойства, определенные с помощью гравитационных зондов, согласуются с аналогичными показателями, полученными стандартными методами, в пределах 15 % по вязкости и 12 % по сцеплению при доверительной вероятности 0,95 [12]. Прогнозные сопротивления резанию землеройной машиной водонасыщенных грунтов (включая техногенный ил, серую черноморскую глину, океанические осадки, а также модели, составленные на основе глубоководных кернов) согласуются с расчетными значениями в пределах 20 %.

### МЕТОДЫ НЕПРЕРЫВНОЙ ОЦЕНКИ МОРСКОГО ДНА

Предложены методы, устройства и оборудование позволяют в непрерывном режиме проводить поиск и разведку месторождений полезных ископаемых, оценивать прочностные характеристики и сопротивление разработке поверхностного слоя

грунта в условиях естественного залегания, а также получать профили этих характеристик по заданному маршруту (Рис. 9).

*Планирующая установка*, предназначена для *маршрутного опробования донных грунтов* с заданной дискретностью по времени и расстоянию. *Буксируемый донный разведчик* позволяет получать прочностные свойства донного грунта по ходу движения судна и эксплуатационные характеристики предполагаемых трасс землеройной машины.

Предложены методы *интегральной оценки типа осадков* по эхограммам акустического зондирования (Рис. 10) и *спектрозональному фотографированию морского дна* (см. Рис. 9), соответствующее оборудование для распознавания полезных ископаемых, залегающих на дне, и интерпретации их вещественного состава.

В качестве подводных носителей аппаратуры использованы глубоководные *буксируемые фото- и телеустановки, геоакустические комплексы* для исследования морского дна, трубчатые цилиндрические и черпаковые *пробоотборники* и другие погружаемые устройства (см. Рис. 6, 7, 9).

Эти методы и технические средства рассчитаны на работу с борта научно-исследовательского судна, движущегося со скоростью 0,5...1,5 м/с [23]. Они позволяют повысить производительность и снизить трудоемкость исследования морского дна на максимальных глубинах, обеспечивают более эффективную эксплуатацию машин под водой при дистанционном управлении. Новизна разработанных методов и технических средств подтверждена 15 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения.

### БЕСКОНТАКТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОННЫХ МАССИВОВ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют придать разработанным методам конкретный вид и сформулировать основные требова-

ния к оценке параметров взаимодействия ГГРМ со средой [24, 25].

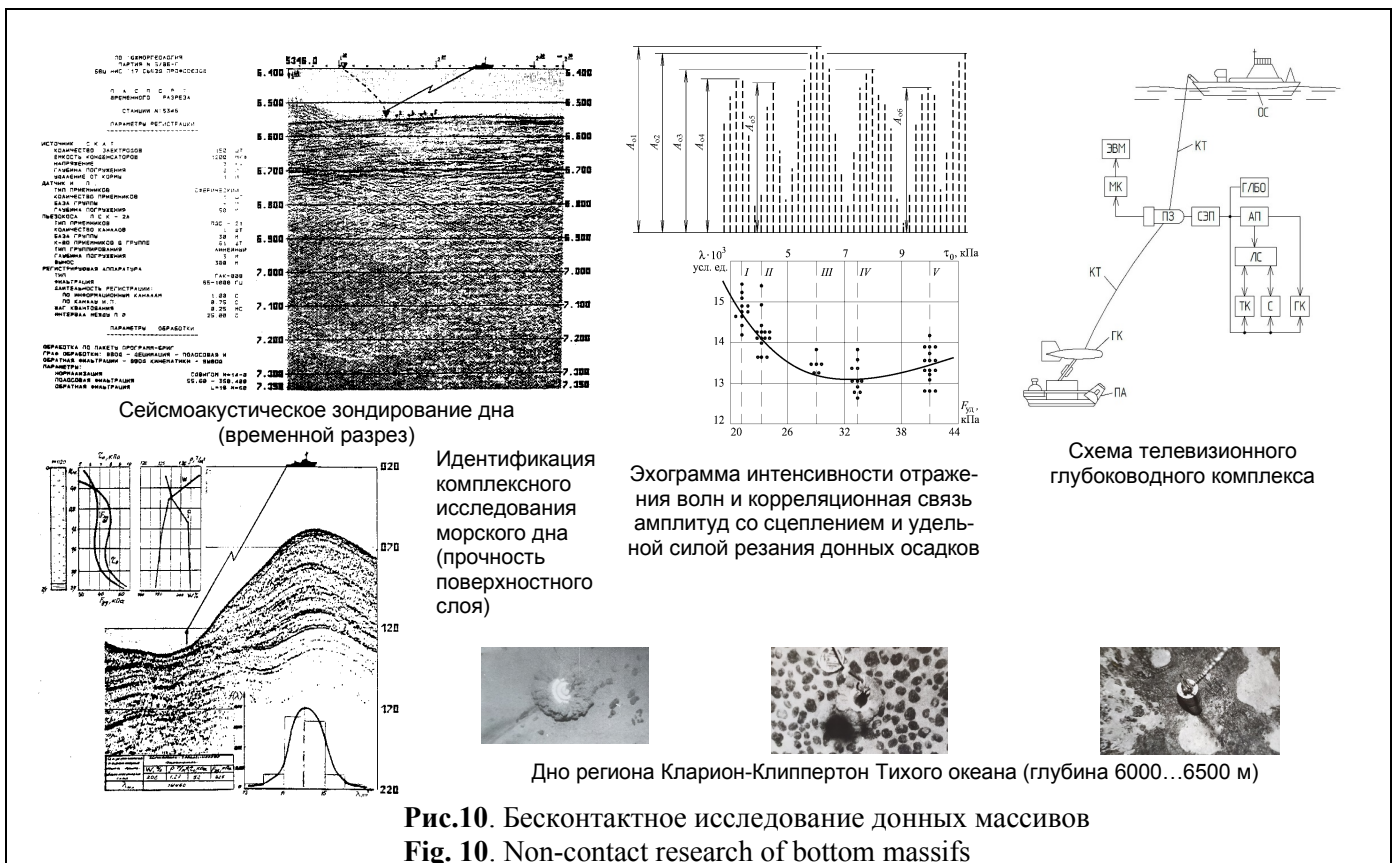
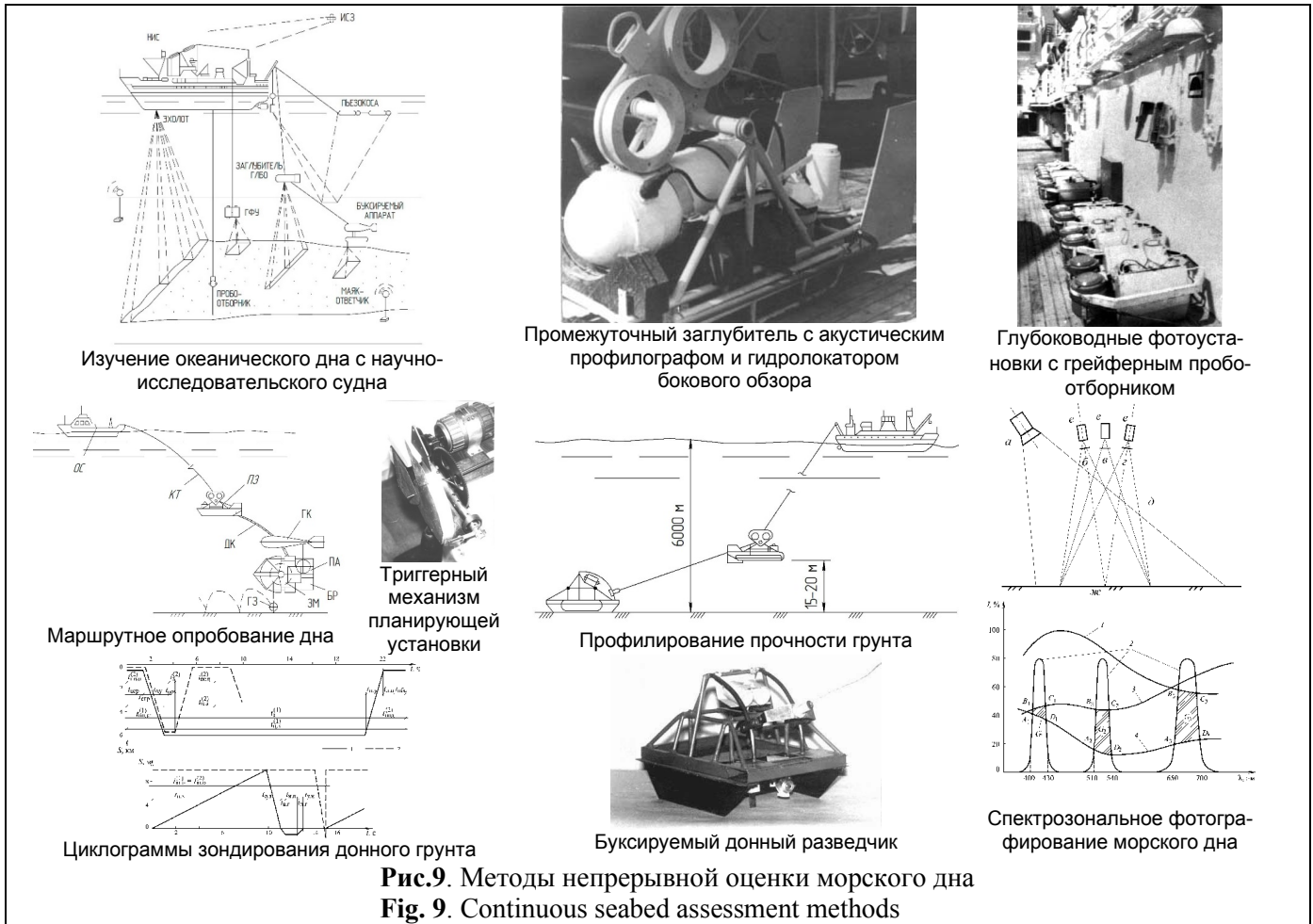
Эксплуатационный донный фон включает: определение *физико-механических свойств подводного грунта, сопротивлений разрушению* рабочими органами, *несущей способности, характера рельефа морского дна*. Однако, задача сводится не только к нахождению этих параметров на станциях пробоотбора (12×12; 6×6; 3×3 км), но и к установлению границ распространения определенных типов осадков, выявлению непроходимых участков дна – т.е. *определению области возможного функционирования подводных землеройных систем*.

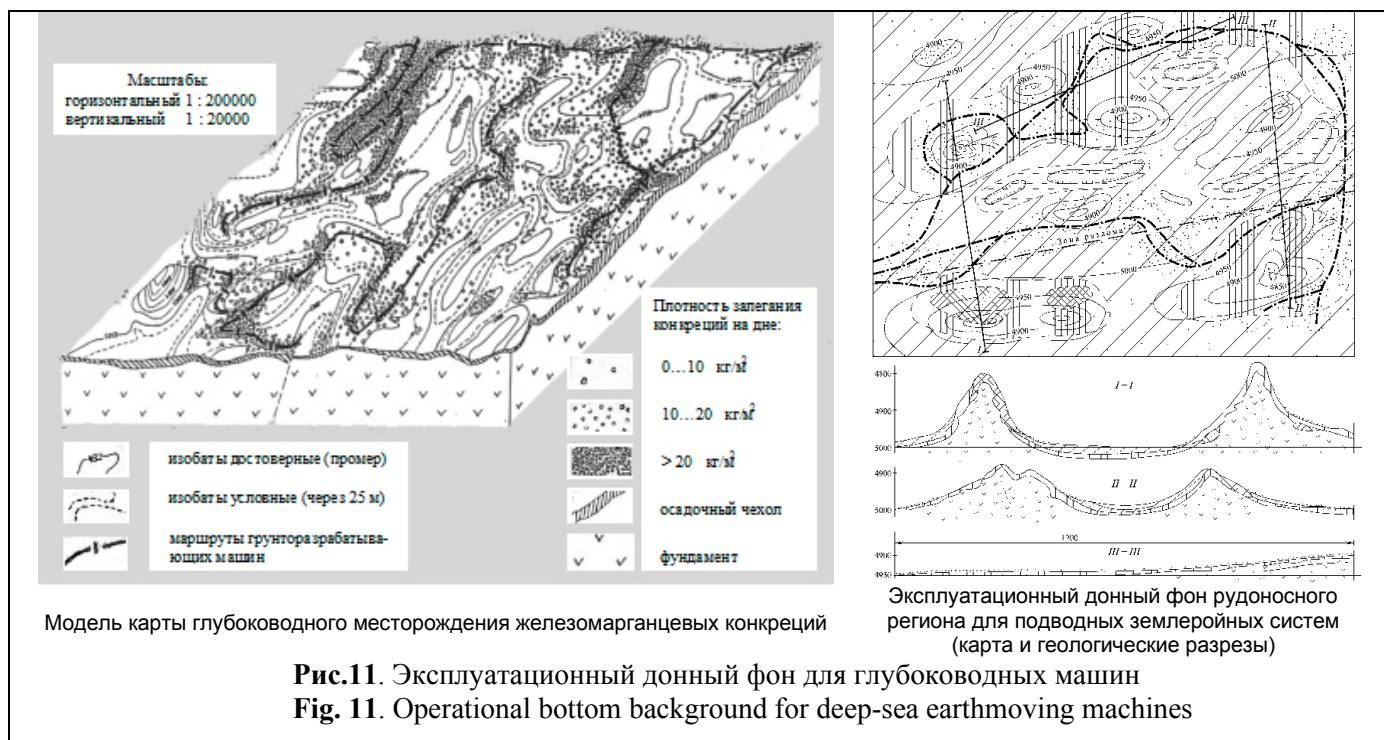
Этой цели служат комплексные исследования с привлечением *методов геоакустического зондирования, фото- и телепрофилирования* морского дна (см. Рис. 10). Гидролокатор позволяет получать изображение местности в плане (типа аэрофотоснимка), а профилограф фиксирует характер залегания слоев осадков, морфологию дна, очертание осадочных структур. Установленные корреляционные связи между сцеплением, удельным сопротивлением и амплитудами отражающих сигналов на эхограммах позволяют разработать *методы интегральной оценки типа осадков*.

*Фотопрофилирование*, проводимое глубоководными фотоустановками, позволяют детализировать донную обстановку с определенным шагом (до 15 м) и оценить количество и состав твердых полезных ископаемых, залегающих на поверхности дна (см. Рис. 6, 7, 9). Метод *спектрозонального фотографирования под водой* дает возможность определять состав и продуктивность месторождений полезных ископаемых на ходу судна (без подъема образцов).

Все эти характеристики, дополненные данными о зонах непроходимости машины и батиметрии поверхности, дают материал для составления обстоятельных *карт эксплуатационного донного фона* (Рис. 11). Наличие достаточного числа инженерно-геологических разрезов на таких картах обеспечит *эффективное функционирование на дне подводных грунтообрабатывающих систем*.







## ВЫВОДЫ

Исследования, проводимые как в натуральных, так лабораторных и полигонных условиях, позволяют усовершенствовать и создавать новые методы идентификации рабочих процессов глубоководных машин, базирующиеся на взаимосвязях между сопротивлением разрушению грунтов и их деформационно-прочными свойствами, а также параметрами динамического нагружения, геоакустического зондирования и фотопрофилирования подводных трасс [26, 27].

Практическое значение работы заключается в:

1) разработке методик определения свойств донных грунтов (in situ) и рабочих нагрузок подводных землеройных машин;

2) созданию устройств, стендов, установок, приборов для точечного и непрерывного по ходу движения судна опробования грунтов на глубине до 6500 м и в бортовых условиях;

3) предложенных новых методах и техники для инженерно-геологического исследования морского дна in situ;

4) раскрытия механизма взаимодействия рабочих органов землеройных машин с

подводными вязкопластичными грунтами на основе выявленных закономерностей взаимодействия их разрушению от свойств текучей среды, гидростатического давления и параметров рабочего процесса, учитывающие фазовое состояние, фильтрационную способность грунта, степень изолированности среды (дренирования воды из зоны деформации), уравновешенность системы «рабочий орган – жидкость – грунт» (величину консолидации грунта);

Полученные результаты исследований, опробованное в лабораторных и производственных условиях оборудование позволяют составлять техническое задание на разведку океанических месторождений твердых полезных ископаемых, карты эксплуатационного донного фона, проектировать глубоководные грунтоработные системы [28, 29].

Таким образом, проведенные в КНУБА совместно с организациями-партнерами исследования имеют важное народнохозяйственное значение для паритетного доступа государства к минерально-сырьевым и энергетическим ресурсам Мирового океана, выхода на международные рынки с современной наукоемкой продукцией и технологией.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Половка С.Г., 2015.** Историчний зріз геологічного вивчення Азово-Чорноморського регіону дослідниками України. Підводні технології, Вип.01, 11-23.
2. **Казмін Ю.Б., Волков А.Н., Глумов И.Ф. и др., 1989.** Международно-правовые и экономические проблемы поиска, разведки и освоения минеральных ресурсов глубоководных районов Мирового океана. Геленджик, ПО Южморгеология, 143.
3. **Закон України про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року, 2011.** Відомості Верховної ради України (ВВР), № 44, ст. 457.
4. **Морское право, 1984.** Официальный текст Конвенции ООН по морскому праву с приложениями и предметным указателем. Заключительный акт 3-й конференции ООН, 316.
5. **Куликов П.М., Сукач М.К., 2015.** О готовности Украины к освоению полезных ископаемых Мирового океана. Подводные технологии, Вып.02, 3-10.
6. **Баладинский В.Л., Сукач М.К., 1999.** Подводные строительные работы: учеб. пособ. Київ, ИСМО, 224.
7. **Баловнев В.И., 1981.** Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. Учеб. пособ., Высшая школа, 335.
8. **Моисеенко В.Г., Сукач М.К., 1991.** Энергоемкость разрушения донных отложений механическим и гидравлическим способами. Строительные и дорожные машины, №7, 23-24.
9. **Іванік О.М., 2015.** Моделювання впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування транспортних природно-техно-генних систем в умовах морського середовища. Підводні технології, Вип. 01, 13-22.
10. **Сукач М.К., 1999.** Ідентифікація робочих процесів глибоководних ґрунторозробних машин. А/реф. дис...д.т.н., спец. 05.05.04, Київ, КНУБА, 1-33.
11. **Сукач М.К., 1993.** Методы и устройства глубоководного исследования морского дна: монография. Киев, Деп. в ГНТБ Украины 13.07.93, № 1484-Ук 93, 111.
12. **Сукач М.К., 1997.** Гравитационное зондирование грунтов: монография. Киев, Наукова думка, 172.
13. **Вялов С.С., 1978.** Реологические основы механики грунтов. Москва, Высшая школа, 447.
14. **Моисеенко В.Г., 1987.** Прогнозирование рабочих нагрузок землеройных машин в особых условиях: монография. Киев, Вища школа, 194.
15. **Кравець С.В., 2008.** Теорія руйнування робочих середовищ. Навч. посіб. Рівне, НУВГП, 124.
16. **Сукач М.К., 2019.** Модель щелевого резання ґрунта под геостатическим давлением. Підводні технології, Вип.09, 13-25.
17. **Сукач М.К., 2004.** Рабочие процессы глубоководных машин: монография. Киев, Наукова думка, 364.
18. **Сукач М.К., Комоцька С.Ю., 2017.** Прогнозування зусиль різання ґрунтів по геологічним кернам. Матеріали III міжнар. наук.-практ. конф. Underwater Technologies 2017, 28.
19. **Сукач М.К., 1998.** Самоходная установка для сбора железомарганцевых конкреций. Известия вузов. Строительство, Вип. 9, 99-103.
20. **Хмара Л.А., Кравець С.В., Нічке В.В. та ін., 2010.** Машини для земляних робіт: навч. посіб. Рівне–Дніпропетровськ–Харків, 557.
21. **Сукач М.К., 2016.** Будівельна техніка: підручник. Київ, Ліра-К, 416.
22. **Сукач М.К., 2011.** Конструювання землерійно-дорожніх машин: навч. посіб. Київ, КНУБА, 260.
23. **Сукач М.К., 2012.** Глибоководная техника и технология для разработки полезных ископаемых Мирового океана. Труды VI Междунар. науч.-техн. конф. Энергия-2012, Симферополь-Алупка, 9.
24. **Франчук В.П., Бондаренко А., 2015.** Математическая модель движения несущего потока в классификаторе гидравлическом горизонтальном. Підводні технології, Вип.01, 24-31.
25. **Блинцов В.С., 1998.** Привязные подводные системы. Киев, Наукова думка, 230.
26. **Сукач М.К., Горбатюк Є.В., Марченко О.А., 2013.** Синтез землерійної і дорожньої техніки: підручник. Київ, Ліра-К, 376.
27. **Сукач М.К., Маркетинг технічних інновацій: навч. посіб.. Київ, Ліра-К, 2013, 414.**
28. **Шнюков Е.Ф., Зиборов, А.П., 2004.** Минеральные богатства Черного моря. Киев, Карбон-ЛТД, 279.
29. **Правила** регистрации первоначальных вкладчиков и положение о конфиденциаль-

ности данных и информации, 1986. Подготовительная комиссия для Международного органа поморскому дну и Международного трибунала по морскому праву. Кингстон, Ямайка, 42.

30. **Сукач М.К., Николенко И.В., 2014.** Трансфер инновационных технологий: монография. Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 482.

### REFERENCES

1. **Polovka S.G., 2015.** Istorichnij zriz geologichnogo vivchennja Azovo-Chornomors'kogo regionu doslidnikami Ukraini. *Pidvodni tehnologii*, Vyp. 01, 11-23 (in Russian).
2. **Kazmin Ju.B., Glumov I.F., Korsakov O.D. i dr., 1988.** Principy podscheta prognoznyh resursov i zapasov polimetallicheskih konkretij Mirovogo okeana. *Gelendzhik, PO Juzhmorgeologija*, 104 (in Russian).
3. **Zakon Ukrai'ny pro zatverdzhennja Zagal'noderzhavnoi' programy rozvytku mineral'no-syrovynnoi' bazy Ukrai'ny na period do 2030 roku, 2011.** Vidomosti Verhovnoi' rady Ukrainy (VVR), No.44, 457 (in Ukrainian).
4. **Morskoe pravo, 1984.** Oficial'nyj tekst Konvencii OON po morskomu pravu s prilozhenijami i predmetnym ukazatelem. *Zakljuchitel'nyj akt 3-j konferencii OON po morskomu pravu.* New York, OON, 316 (in Russian).
5. **Kulikov P.M., Sukach M.K., 2015.** O gotovnosti Ukrainy k osvoeniju poleznyh iskopaemyh Mirovogo okeana. *Pidvodni tehnologii*, Vyp.02, 3-10 (in Russian).
6. **Baladinskij V.L., Sukach M.K., 1999.** Podvodnye stroitel'nye raboty: ucheb. posob. Kyiv, ISMO, 224 (in Russian).
7. **Balovnev V.I., 1981.** Modelirovanie processov vzaimodejstvija so sredoj rabochih organov dorozhno-stroitel'nyh mashin. *Ucheb. posob., Vysshaja shkola*, 335 (in Russian).
8. **Moiseenko V.G., Sukach M.K., 1991.** Jenergoemkost' razrushenija donnyh otlozhenij mehanicheskim i gidravliche-skim sposobami. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, No.7, 23-24 (in Russian).
9. **Ivanik O.M., 2015.** Modeljuvannja vplyvu nebezpečnyh geologichnyh procesiv na funkcionuvannja transportnyh pryrodno-tehnogeny system v umovah mors'kogo seredovyshha. *Pidvodni tehnologii*, Vyp. 01, 13-22 (in Ukrainian).
10. **Sukach M.K., 1999.** Identyfikacija robochyh procesiv glybokovodnyh gruntorozrobnyh mashyn. A/ref. dis...d.t.n., spec. 05.05.04, Kyi'v, KNUBA, 1-33 (in Ukrainian).
11. **Sukach M.K., 1993.** Metody i ustrojstva glybokovodnogo issledovanija morskogo dna: monografija. Kiev, Dep. v GNTB Ukrainy 13.07.93, № 1484-Uk 93, 111 (in Russian).
12. **Sukach M.K., 1998.** Razrabotka glybokovodnyh gruntov: monografija. Kiev, Naukova dumka, 348 (in Russian).
13. **Vjalov S.S., 1978.** Reologicheskie osnovy mehaniki gruntov. Moskva, Vysshaja shkola, 447 (in Russian).
14. **Moiseenko V.G., 1987.** Prognozirovanie rabochih nagruzok zemlerojnyh mashin v osobyh uslovijah: monografija. Kiev, Vishha shkola, 194 (in Russian).
15. **Kravec' S.V., 2008.** Teorija rujnuvannja robochyh seredovyshh. *Navch. posib. Rivne, NUVGP*, 124 (in Ukrainian).
16. **Sukach M.K., 2019.** Model' shhelevogo rezanija grunta pod geostaticeskim davle-niem. *Underwater Technologies*, Vyp.09, 13-25 (in Russian).
17. **Michael Sukach, 2004.** Workings processes of deep-water macyines: monografija. Kiev, Naukova dumka, 364 (in Russian).
18. **Сукач М.К., Комоцька С.Ю., 2017.** Прогнозування зусиль різання ґрунтів по геологічним кернам. *Матеріали III міжнар. наук.-практ. конф. Underwater Technologies*, 28 (in Ukrainian).
19. **Sukach M.K., 1998.** Samohodnaja ustanovka dlja sbora zhelezomargancevyh konkretij. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*, Vyp. 9, 99-103 (in Russian).
20. **Hmara L.A., Kravec' S.V., Nichke V.V. ta in., 2010.** Mashyny dlja zemljanyh robit: navch. posib. Rivne–Dnipropetrovs'k–Harkiv, 557 (in Ukrainian).
21. **Sukach M.K., 2016.** Budivel'na tehnika: pidruchnyk. Kyiv, Lira-K, 416 (in Ukrainian).
22. **Sukach M.K., 2011.** Konstrujuvannja zemlerijno-dorozhnyh mashin: navch. posib. Kiiv, KNUBA, 260 (in Ukrainian).
23. **Sukach M.K., 2012.** Glybokovodnaja tehnika i tehnologija dlja razrabotki poleznyh iskopaemyh Mirovogo okeana. *Trudy VI Mezhdunar. naukch.-tehn. konf. Energija-2012, Simferopol', Alupka*, 9 (in Russian).
24. **Franchuk V.P., Bondarenko A.A., 2015.** Mate-maticeskaja model' dvizhenija nesu-shego potoka v klassifikatore gidravliches-kom gori-

- zontal'nom. Underwater Technologies, Vyp.01, 24-31 (in Russian).
25. **Blintsov V.S., 1998.** Privjaznye podvodnye sistemy. Kiev, Naukova dumka, 230 (in Russian).
  26. **Sukach M.K., Gorbatjuk E.V., Marchenko O.A., 2013.** Sintez zemlerijnoї i dorozhn'oi tehnik: pidruchnik. Kyiv, Lira-K, 376 (in Ukrainian).
  27. **Sukach M.K.,** Marketyng tehnicnyh innovacij: navch. posib., Kyi'v, Lira-K, 2013, 414 (in Ukrainian).
  28. **Shnjukov E.F., Ziborov, A.P., 2004.** Mineral'nye bogatstva Chernogo morja. Kiev, Karbon-LTD, 279 (in Russian).
  29. **Pravila registracii pervonachal'nyh vkladchikov i polozenie o konfidencial'nosti dannyh i informacii, 1986.** Podgotovitel'naja komissija dlja Mezhdunarodnogo organa po morskomu dnu i Mezhdunarodnogo tribunala po morskomu pravu. Kingston, Jamajka, 42 (in Russian).
  30. **Sukach M.K., Nikolenko I.V., 2014.** Transfer of Innovative Technologies: monografija. Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 482 (in Russian).

#### Operating conditions and assessment of the bottom background of deep-sea vehicles

*Mykhailo Sukach*

**Abstract.** The creation of competitive deep-sea soil-mining machines and complexes allows the transition to the development of deep-water deposits of polymetallic nodules and metalliferous silts, the extraction of sand and sapropel from the bottom of the sea, thus providing parity access to the mineral and energy resources of the World Ocean. The purpose of the work is to create methods and technical means for determining the strength characteristics of bottom soils in the surface layer, aimed at reducing the time of creation and effective use of machines by ensuring that their parameters correspond to real operating conditions.

Usually, the properties of deep-sea soil in its natural bedding (in situ) are determined from the data of photo- and geoacoustic sounding or from cores raised from the seabed to the surface, and the working loads of machines, the resistance of the soil to destruction and other mechanical characteristics are estimated on the basis of the data obtained by geological methods. New methods and devices for point and continuous sampling of the bottom, adequately applied both on the surface and under water, provide sufficient reliability of the information obtained for practical use. The objectives of the study are to substantiate the theory of gravity sensing of underwater soils and their cutting, to determine the deformation and strength properties of the surface layer of the seabed, resistance to mechanical destruction and the characteristics of the interaction of machine mechanisms with silty soil.

The novelty of the research is to establish the features of the interaction of the working bodies and the undercarriage of earth-moving machines with underwater viscoplastic soils, depending on the parameters of the working process, strength properties of the soil, characteristics of dynamic loading and geophotoprofiling of underwater routes. The practical value lies in the substantiation of the operational loads of deep-water earth-moving machines; an assessment of the characteristics of bottom soils in natural bedding, as well as a comprehensive study of bottom massifs, which make it possible to reduce the number of sampling stations, the total labor intensity of voyage operations, to establish an operational bottom background and optimal routes of mining systems.

**Keywords:** gravity sounding of the soil, cutting resistance, geostatic pressure, excavating machine, working loads, bottom background.

## Решение проблем подводной механизированной и автоматической дуговой сварки различных металлоконструкций мокрым способом

*Владимир Лебедев*

Институт электросварки им. Е.О. Патона  
ул. Казимира Малевича 11, Киев, 03680  
[valpaton@ukr.net](mailto:valpaton@ukr.net), [orcid.org/0000-0003-0391-6113](https://orcid.org/0000-0003-0391-6113)

Получено 08.06.2019, принято после просмотра 20.09.2021  
<https://doi.org/10.32347/uwt2021.11.1401>

**Аннотация.** Рассмотрен комплекс задач, связанных с полуавтоматической и автоматической подводной мокрой сваркой, касающихся как оборудования, так и способов реализации дугового процесса. Проведен анализ существующих разработок в рассматриваемой области сварки с выявлением наиболее рациональных конструкций полуавтоматов для сварки порошковой электродной проволокой. Полуавтомат с погружным блоком – самая рациональная конструкция, при этом размещённый в блоке механизм подачи имеет собственный дополнительный корпус, заполненный изолирующее-смазывающей жидкостью, в которую погружён приводной электродвигатель. Отмечено, что особенность сварки-наплавки в водной среде является неудовлетворительное формирование соединения на вертикальной плоскости. Представлены наиболее эффективные способы совершенствования полуавтоматов и автоматов, связанные с модулированными процессами и процессами с регулируемой импульсной подачей электродной проволоки. Показано, что в последнее время наиболее эффективным выбором электродвигателя является его вентильная конструкция, при этом возможен механизм подачи в безредукторном варианте. Для реализации цикла работы полуавтомата и выбранного алгоритма подачи электродной проволоки применяется специально разработанная компьютеризованная система управления и регулирования. Даны результаты применения импульсной подачи электродной проволоки на свойства сварных соединений. Определено, что характеристики импульсной подачи (частота, скважность) влияют на



**Владимир Лебедев**  
главный конструктор  
ГП ОКБ  
д.т.н., проф.

геометрические характеристики шва, а также прочностные свойства, частности пределы текучести и временного сопротивления, что в том числе обусловлено уменьшением неметаллических включений в метале шва и околошовной зоны. Приведены внешние виды наплавленных в водной среде на вертикальную плоскость валиков, при этом очевидно, что формирование при использовании импульсных и модулированных режимов существенно лучше, чем при ведении электродугового процесса с конвенциональной подачей электродной проволоки. Показаны пути дальнейшего совершенствования оборудования для сварки в водной среде мокрым способом. Одним из наиболее перспективных путей повышения технических и технологических возможностей механизированного оборудования для сварки в водной среде является создание и применение систем с комбинированным воздействием на процесс.

**Ключевые слова:** дуговая сварка в водной среде, мокрый способ, оборудование, способы сварки, применение, перспективы.

Дуговая механизированная и автоматическая сварка с применением плавящегося электрода распространённый способ качественного производительного и экономически выгодного способа неразъемного соединения и восстановления различных конструкций деталей и узлов машин и механизмов.

Дуговая сварка в водной среде механизированными или автоматическими системами и оборудованием – один из видов отмеченного способа сварки, находит всё большее распространение в различных сферах деятельности человека с присущими ей проблемами и различными решениями в технической и технологической областях, а также выбором электродных материалов [1].

Укажем, что среди способов сварки под водой распространение получила ручная дуговая мокрая сварка с использованием специальных электродов, а также способ, когда место проведения работ локализуют специальными устройствами (кессонами) с откачиванием воды с места сварки. В последнем случае используется и ручная и механизированная сварка с применением обычных электродных материалов.

Заметим, что мокрая ручная дуговая сварка малопродуктивна и зачастую не обеспечивает нужного качества выполненных работ. Сварка под водой в кессоне весьма затратная и ограничена в применении.

Достаточно давно в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработан способ механизированной мокрой подводной сварки с применением погружных устройств подачи электродной проволоки. Для реализации этого способа сварки разработан ряд технических средств – полуавтоматов различных конструкций, на часть из которых получены авторские свидетельства [2 – 4], порошковых электродных проволок, технологических приёмов применения.

Разработанная в институте электросварки им. Е.О. Патона порошковая проволока марки ППС-АН1 (диаметр 1,2...2,0 мм) позволяет обеспечить стабильное горение дуги и получение (на низкоуглеродистых и

низколегированных конструкционных сталях) сварных соединений, равнопрочных основному металлу. Проволока практически не имеет аналогов и до настоящего времени является основным электродным материалом для полуавтоматов и автоматов, которые используются для мокрой подводной сварки.

Среди предложенных конструкций погружных устройств можно выделить:

- с поддувом воздуха в погружной бокс и применением специальных накопительных камер с воздухом;
- с размещением подающего узла в изолирующе-смазывающей жидкости, а всей системы подачи в водной среде;
- с размещением всего полуавтомата, включая источник сварочного тока, в погружном агрегате.

На основе вышеуказанных предложений в ИЭС им. Е.О. Патона был разработан ряд полуавтоматов, в том числе и тех, которые выпускались серийно или небольшими партиями. В их числе наибольшее распространение получили полуавтоматы А-1660, А-1450, ПШ-141 и ПШ-156.

Отметим, что, согласно [5], в настоящее время в РФ появились полуавтоматы для дуговой сварки мокрым способом, которые практически повторяют разработки ИЭС им. Е.О. Патона 70-х годов прошлого века.

Механизированная сварка в водной среде с применением порошковых электродных проволок нашла достаточно широкое применение, примеры которых изложены в технической литературе [6, 7].

Развивая это способ сварки, были предложены интересные и весьма полезные области его применения с обеспечением соответствующих технических средств для реализации механизированной и механизированной сварки мокрым способом. Среди них для примеров следующие:

- сварка подводной части судов и кораблей на плаву (формирование корпуса) [8];
- специализированное механизированное устройство для сварки под водой труб;
- автоматизированная сварка для герметизации составных труб, в том числе на большой глубине на нефтегазодобываю-

щих объектах и при создании комплексов с тепловыми насосами [9];

- сварка и резка при проведении аварийно-спасательных работ в водной среде;

- автоматизированная сварка на больших глубинах с применением координатно программируемых систем на основе компьютеризированных средств управления и регулирования;

- использование механизированного и автоматического оборудования для утилизационной резки под водой, в том числе и при закрытии использованных нефтяных и газовых скважин.

Всё это оборудование прошло опытно – промышленную проверку, а некоторые из систем используются на промышленных объектах. Часть разработок нуждается в совершенствовании.

Так, например, автомат для приварки заглушек внутри труб, разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона успешно работает на глубинах 230 м.

Следует указать, что проблемы с применением механизированных и автоматизированных технологий дуговых способов подводной сварки мокрым способом и оборудования для них действительно существует и в настоящее время. Решались лишь отдельные конкретные задачи, результаты которых в той или иной степени удовлетворяли производителей. Однако, как известно, универсальных решений в данной проблеме, как и в других технико-технологических системах, пока не существует.

Одной из существенных проблем для погружных узлов системы подачи электродной проволоки механизированного оборудования и систем сварочного перемещения автоматического оборудования для мокрой подводной сварки является надёжность работы приводных электродвигателей постоянного тока с коллекторно-щёточным узлом. В разработках ИЭС им. Е.О. Патона эта проблема решена с применением бесколлекторных электродвигателей – шаговых промышленного производства и специальных вентильных электродвигателей, использование кото-

рых с компьютеризованным управлением и регулированием даёт дополнительные преимущества [10].

- малые габариты, массу и инерционность, в том числе из-за отсутствия необходимости применения механических редукторов (подающий ролик непосредственно на валу электродвигателя);

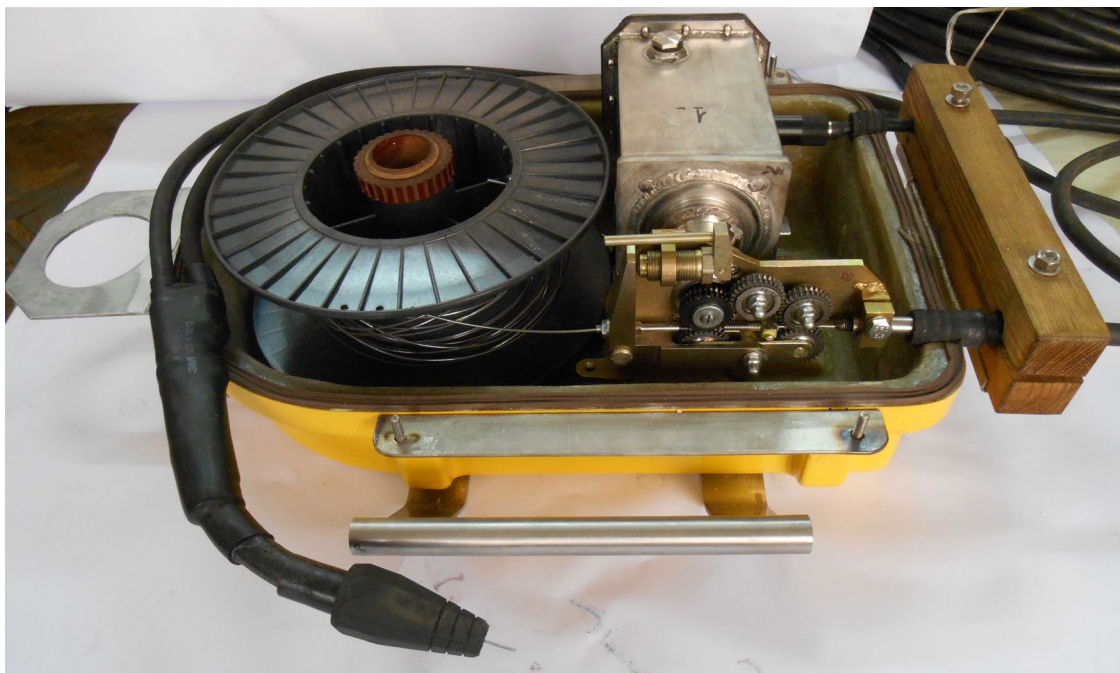
- возможность программирования движения электродной проволоки с достаточно высокой частотой обработки сигнала задания или координатного перемещения сварочного инструмента на плоскости или в пространстве.

Следует обратить особое внимание на конструктивы в которых размещаются узлы погружного блока. В последних конструкциях полуавтоматов для подводной сварки мокрым способом электродвигатель заключен в оболочку из нержавеющей стали с компенсатором давления, а система подающих роликов, выполненная из специальных сталей защищена от обычной коррозии и электроэрозии специальными средствами. Общий корпус сформирован из пластика, который обычно применяется при строительстве корпусов яхт и других маломерных судов.

Одна из последних разработок полуавтомата в прочном пластиковом корпусе безредукторным приводом на основе высокомоментного шагового электродвигателя представлена на Рис.1. Такие полуавтоматы могут эксплуатироваться в пресной и солёной воде на глубинах до 40 м, т.е. тех глубинах, где могут работать водолазы – сварщики. При этом, кроме сварки, применяя специальные электродные проволоки, можно вести эффективную резку металла.

В технике и технологии дуговой сварке основным направлением совершенствования в настоящее время являются использование импульсных алгоритмов функционирования основных активных систем оборудования. В частности, широко используются инверторные источники с импульсным формированием выходных параметров, в том числе и синергетические.





**Рис.1.** Полуавтомат последнего поколения для подводной сварки мокрым способом с открытой крышкой

**Fig. 1.** Latest generation semiautomatic underwater wet welding machine with open cover

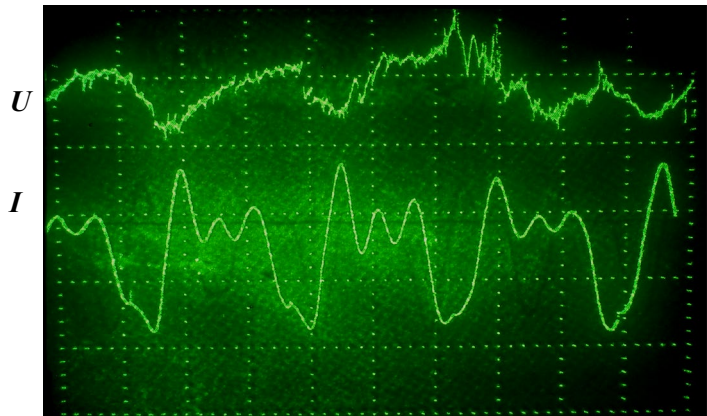
В последнее время получает развитие способы сварки с модуляцией режимов и выбранными (частично на основе теоретических изысканий с решением задачи управления формированием и кристаллизацией металла шва, частично на основе экспериментальных исследований) частотой и скважностью модулируемых параметров. Такая технология, например, оказывается применимой при подводной дуговой сварке мокрым способом при выполнении вертикальных соединений, выполнение которых представляет определённую сложность, как по формированию шва, так и по качеству металла. На Рис.2 показан пример выполнения наплавки конструкционных сталей в водной среде на вертикальной плоскости порошковой электродной проволокой с параметрами: ток – 170...180 А; напряжение 26...27 В. Модулируется скорость подачи со време-

нами: импульс 0,6 С и пауза 0,4 С. Процесс осуществляется механизмом подачи с любыми типами приводных электродвигателей как коллекторных так бесколлекторных, включая шаговые и вентильные с частотами управления модуляцией 0,2...2,0 Гц.

Применение процесса с модуляцией скорости подачи электродной проволоки позволяет в определённой степени решить задачу сварки на вертикальной плоскости с получением сформированных валиков. Такой процесс, как показывают металлографические исследования, практически не оказывает существенного влияния на структуру металла шва, полученного в водной среде. Это, по нашему мнению, является следствием увеличенной скорости кристаллизации наплавленного металла в водной среде в сравнение со сваркой в атмосферных условиях.



1 2 3



**Рис.2.** Наплавленые на вертикальную плоскость под водой валики и осциллограммы напряжения  $U$  и тока  $I$  при наплавке с модуляцией скорости подачи проволоки: 1 – наплавка без модуляции; 2, 3 – валики с модуляцией с разными направлениями ведения процесса

**Fig. 2.** Rolls welded on a vertical plane under water and oscillograms of voltage  $U$  and current  $I$  when surfacing with modulated wire feed rate: 1 – surfacing without modulation; 2, 3 – rolls with modulation with different process directions

Исследование процесса подводной сварки мокрым способом с применением источников сварочного тока инверторного типа, имеющих возможность генерировать импульсы тока с управляемыми параметрами, заметных эффектов, насколько нам известно, не дали, в частности по изменению структуры металла шва или валика. Мы считаем, что это обстоятельство можно объяснить особыми скоростными условиями кристаллизации металла шва.

В последнее время, опираясь на исследования в области систем подачи электродной проволоки, а также последних разработок в области электротехники и компьютеризованного управления, рассматриваемых как комплектные мехатронные системы, разрабатывается оборудования для импульсной подачи по определённой программе электрода в полуавтоматах и автоматах для дуговой сварки.

Для механизированной и автоматической сварки разработан и используется безредукторный электропривод на основе серийно выпускаемых шаговых и специально разработанных вентильных электро-

двигателей с компьютеризованной системой управления, позволяющей реализовать практически любой алгоритм движения электродной проволоки. При этом вентильный электропривод последних разработок обеспечивает регулируемую по частоте, скважности и амплитуде импульсную подачу электродной проволоки с максимальными частотами 50...60 Гц.

Указанный электропривод исследовался в составе автоматического и механизированного оборудования при сварке – наплавке в водной среде мокрым способом. Представляет особый интерес получение вертикальных и горизонтальных сварных швов на вертикальной плоскости с достаточными по формированию и качеству наплавленного металла. Применение импульсной подачи электродной проволоки с эффективно выбранными параметрами позволяет решить эту задачу.

При импульсной подаче электродной проволоки с рационально выбранными параметрами реализуется управляемый перенос электродного металла по принципу каждому импульсу подачи соответствуют



**Рис.3.** Валики, наплавленні в водній середі з використанням імпульсної подачі електродної з різними характеристиками – частота, амплітуда, скважність

**Fig. 3.** Rollers clad in aqueous medium using pulse electrode feed with different characteristics – frequency, amplitude, duty cycle

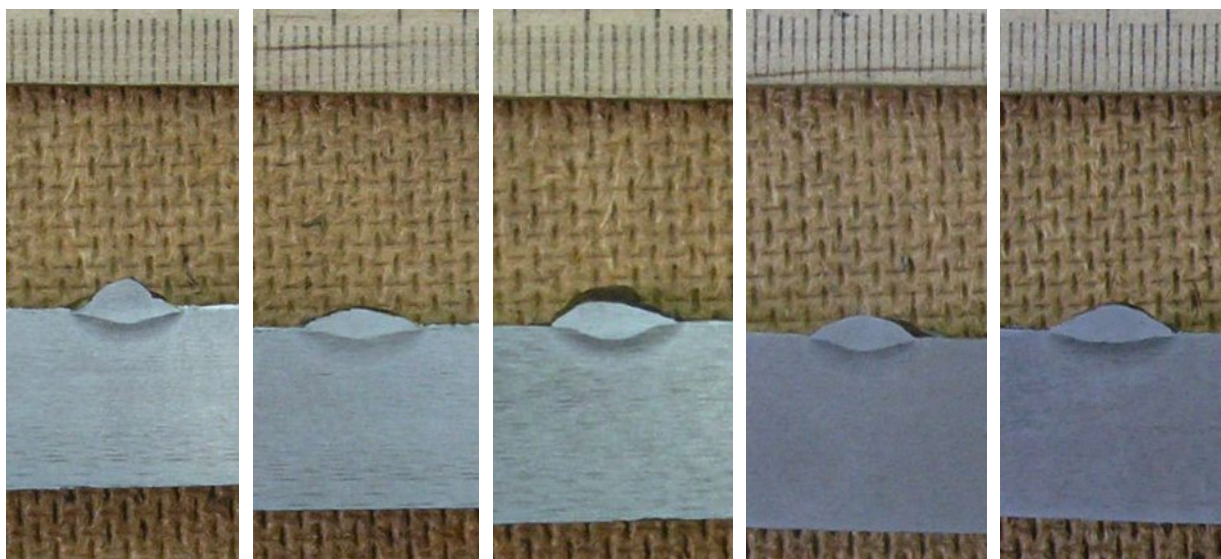
перенос капли расплавленного металла определённого размера. Ускорение, которое при импульсном движении придаётся капле способствует точному транспортированию капли в расплавленную ванну,

что весьма эффективно при ведении процесса на вертикальной плоскости. Особенности переноса электродного металла при подводной сварке мокрым способом с применением импульсной подачи требуют отдельного рассмотрения.

На Рис. 3 представлены образцы валиков, наплавленных в водной среде с применением импульсной подачи проволоки с разными характеристиками импульсного движения, но с практически одинаковыми значениями тока, напряжения и скорости ведения процесса. Ток и напряжение дугового процесса 160...170 А; 26...28 В соответственно. Скорость ведения наплавки – 10...12 м/час.

Можно отметить, что формирование валиков существенно более равномерно наполненное, имеющее более регулярный характер. Важным является возможность достаточно интенсивного влияния на параметры валиков: ширину, усиление, глубину проплавления. Характерные микрошлифы некоторых валиков, представленных на Рис. 3, показаны на Рис. 4.

Необходимо отметить, что тенденции изменения геометрических размеров наплавленных валиков соответствуют тем, которые получены при наплавке в обыч-

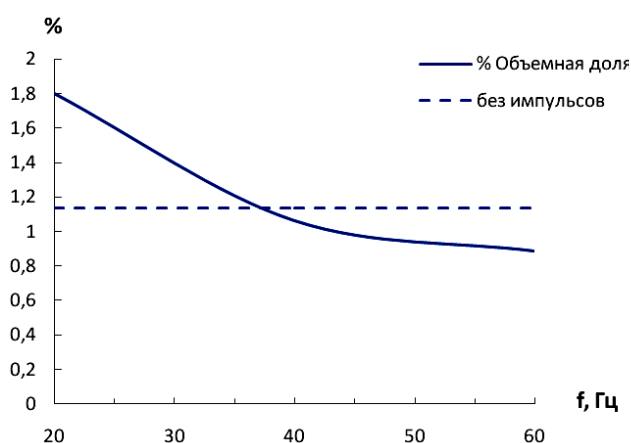


**Рис.4.** Микрошлифы валиков, наплавленных с использованием управляемых импульсов подачи электродной проволоки

**Fig. 4.** Microslips of rolls clad using controlled pulses of the electrode wire

ных условиях, хотя и менее выражены, что, в общем, объясняется существенно более высокой скоростью охлаждения жидкой ванны.

Особое внимание уделено качественному анализу наплавленного металла наплавленного в водной среде, который проводился на основании исследований микрошлифов поперечных сечений валиков, прочностных (механических) характеристик, состава металла валика и околошовной зоны. Практически по всем параметрам наплавленные с импульсной подачей электродной проволоки превосходят валики, полученные при использовании конвенциональной подачи с тенденциями улучшения характерными с процессами, получаемыми на открытых пространствах при сварке-наплавке с импульсной подачей порошковой электродной проволоки. Однако есть и отличия. Так, например, объёмная доля неметаллических включений в металле наплавленного валика уменьшается лишь после увеличения частоты импульсов подачи, что можно видеть на графике Рис.5, полученном при экспериментальных исследованиях. Это опять, как нам представляется, связано с особенностями характеристик кристалли-



**Рис.5.** Сравнительные графики наличия неметаллических включений в металле валиков при наплавке с разными способами подачи электродной проволоки

**Fig. 5.** Comparative graphs of non-metallic inclusions in roll metal when cladding with different ways of feeding electrode wire feeding

зации металла шва и околошовной зоны в водной среде.

Некоторое улучшение механических свойств швов, полученных при сравнительных исследованиях сварки с применением конвенциональной и импульсной подачи электродной проволоки с управляемыми параметрами демонстрируют графики, представленные на Рис.6.

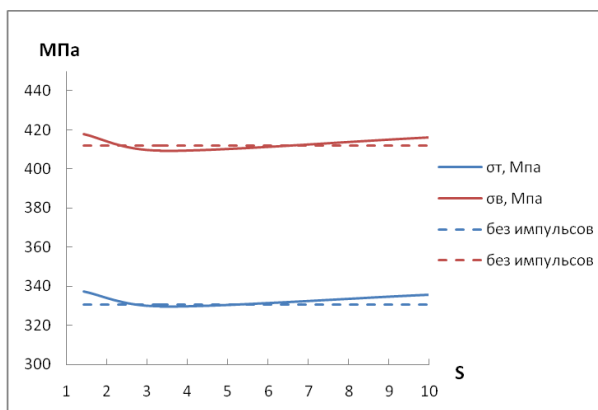
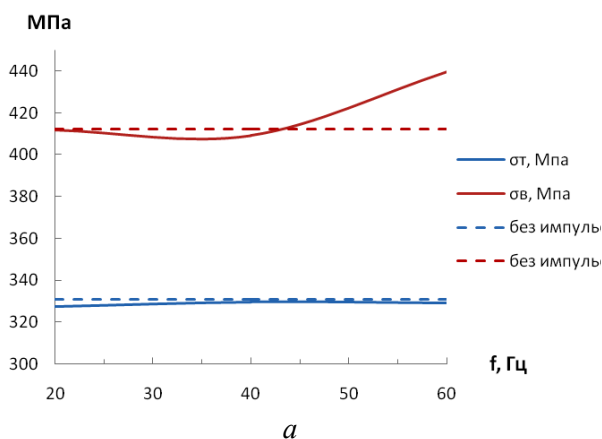
Эти результаты косвенно подтверждают тот факт, что в металле швов или наплавленных в водной среде валиков при использовании импульсной подачи электродной проволоки происходит изменение кристаллической структуры, связанной с некоторой дезориентацией кристаллитов. Этот процесс менее интенсивен, чем это происходит при обычных условиях, что, как уже отмечалось, связано с особыми условиями охлаждения жидкой ванны в воде.

Следует констатировать, что большинство положительных эффектов от импульсной подачи электродной проволоки заметно проявляется при определённом увеличении частоты импульсного движения.

Хорошо известно [11], что качественная сварка с минимизацией деформаций различного типа возможна в случае обеспечения минимальных тепловых вложений в реализацию процесса. Сварка с импульсной подачей электродной проволоки характеризуется пониженными энергозатратами, что в сочетании с интенсивным охлаждением обеспечивает малые деформации свариваемой конструкции, в частности из тонколистовых материалов.

Способы сварки с импульсной подачей электродной проволоки постоянно совершенствуются и развиваются. Часть из них, по нашим убеждениям, основанных на опыте исследовании разработки таких систем, с успехом может быть применима для реализации высокоэффективной сварки в водной среде конструкций с разным пространственным положением.

К числу перспективных способов сварки с импульсной подачей электродной проволоки, применимых в водной среде следует отнести:



б

**Рис.6.** Зависимости между пределами текучести и временного сопротивления от частоты (а) и скважности (б)

**Fig. 6.** Dependences between yield strength and time resistance on frequency (a) and wellbore (b)

- совместное применение импульсной подачи и модуляции режимов (ток и напряжение сварки как с синхронизацией та и без синхронизации воздействий);
- использование нового способа сварки с дозированной подачей электродной проволоки;
- синхронизированное по определённому алгоритму импульсное воздействие импульсной подачи электродной проволоки и импульсного воздействия источника сварочного тока.

Каждый из указанных способов подводной сварки с применением импульсной подачи электродной проволоки может решить определённый комплекс задач при ведении процесса подводной сварки мок-

рым способом, при этом в большинстве способов может быть применён практически любой тип источника сварочного тока, в том числе самый простой по конструкции и возможностям.

Следует отметить, электроприводы с компьютеризованными вентильными и шаговыми электроприводами применяются для оснащения систем сварочного и установочного перемещения в автоматизированном оборудовании для подводной сварки.

## ВЫВОДЫ

1. К настоящему времени разработано несколько разных конструкций полуавтоматов для подводной сварки порошковыми самозащитными электродными проволоками мокрым способом, но наибольшее распространение как общего назначения так и для решения специфических задач получило оборудование с изолированным подающим узлом, полость которого заполнена изолирующей – смазывающей жидкостью.

2. Полуавтоматы и автоматы для подводной сварки постоянно совершенствуются, а основным направлением их совершенствования является применение систем подачи электродной проволоки с управляемыми импульсными параметрами движения, рациональный выбор которых обеспечивает возможной высокоэффективной сварки в нижнем и вертикальном положениях с возможностью регулирования геометрических размеров швов и валиков, получения соединения с улучшенными механическими характеристиками.

3. Сложность применения импульсных технологий при сварке в водной среде мокрым способом как за счёт импульсных алгоритмов функционирования источников сварочного тока, так и вследствие импульсной подачи электродной проволоки заключается в высокой скорости охлаждения сварочной ванны, которая существенно превосходит скорость в обычных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борис Патон, Владимир Лебедев, Геннадий Жук, 2017.** Достижения и перспективы разработки механизированного и автоматического оборудования для дуговой подводной сварки мокрым способом. Підводні технології, Вип.06, 28-36.
2. **Патон В.Е., Смолярко В.Б., Бельфор М.Г., Пичак В.Г. и др., 1969.** Авторское свидетельство СССР 256914. Устройство для подводной сварки. Зарегистрировано 03.09.1969.
3. **Патон В.Е., Смолярко В.Б., Бельфор М.Г., Пичак В.Г. и др., 1973.** Авторское свидетельство СССР 382327. Устройство для подводной сварки. Зарегистрировано 21.02.1973.
4. **Патон В.Е., Смолярко В.Б., Бельфор М.Г., Пичак В.Г. и др., 1975.** Авторское свидетельство СССР 492131. Устройство для подводной сварки. Зарегистрировано 22.07.1975.
5. **Левченко А.М., Паршин С.Г., Антипов И.С., 2018.** Отечественная технология, сварочный комплекс и порошковая проволока для механизированной подводной сварки и резки мокрым способом. Мир сварки, Вып. 01, 18-20.
6. **Конonenko В.Я., Рыбченков А.Г., 1994.** Опыт мокрой механизированной сварки самозащитными порошковыми проволоками при ремонте под водой газо- и нефтепроводов. Автоматическая сварка, Вып.09-10, 29-32.
7. **Конonenko В.Я., 2005.** Технология мокрой механизированной сварки при строительстве МЛСП Приразломная. Автоматическая сварка. Вып.09, 37-39.
8. **Савич И.М., Рыбченков А.Г., Паньков В.И., Игнатушенко А.А., Патон В.Е., Смолярко В.Б., Бельфор М.Г., Пичак В.Г., 1976.** Авторское свидетельство СССР 498131 Способ формирования корпуса судна на плаву. Опубликовано 05.01.76, БИ 01.
9. **Vladimir Lebedev, 2016.** Unique automatic arc for deep underwater welding wet process under hard limited. Судходство, Вып.02, 62-64.
10. **Лебедев В.А., Гулый М В., 2014.** Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки. Мехатроника. Автоматизация, Управление, Вып.06, 47-51.
11. **Лебедев В.А., Гедрович А.И., Бородина К.В., 2013.** Электродуговая сварка плавлением металлов малой толщины. Сборник тезисов стендовых докладов Международной конференции Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее, 25-26.11.2013, 80-81.
12. **Пётр Куликов, Михаил Сукач, 2015.** О готовности Украины к освоению полезных ископаемых Мирового океана. Підводні технології, Вип.02, 3-10.
13. **Sergey Maksimov, Alla Radziewskaya, Liudmyla Nyrkova, Switlana Osadchuk, 2021.** Corrosion resistance of welded joints made by underwater wet welding. Transfer of Innovative Technologies, Vol.4, No.1. 41-46.

REFERENCES

1. **Boris Paton, Vladimir Lebedev, Gennadij ZHuk, 2017.** Dostizheniya i perspektivy razrabotki mekhanizirovannogo i avtomaticheskogo oborudovaniya dlya dugovoj podvodnoj svarki mokrym sposobom. Underwater Technologies, Iss.06, 28-36 (in Russian).
2. **Paton V.E., Smolyarko V.B., Bel'for M.G., Pichak V.G. i dr., 1969.** Avtorskoe svidetel'stvo SSSR 256914. Ustrojstvo dlya podvodnoj svarki. Zaregistrirvano 03.09.1969 (in Russian).
3. **Paton V.E., Smolyarko V.B., Bel'for M.G., Pichak V.G. i dr., 1973.** Avtorskoe svidetel'stvo SSSR 382327. Ustrojstvo dlya podvodnoj svarki. Zaregistrirvano 21.02.1973 (in Russian).
4. **Paton V.E., Smolyarko V.B., Bel'for M.G., Pichak V.G. i dr., 1975.** Avtorskoe svidetel'stvo SSSR 492131. Ustrojstvo dlya podvodnoj svarki. Zaregistrirvano 22.07.1975 (in Russian).
5. **Levchenko A.M., Parshin S.G., Antipov I.S., 2018.** Otechestvennaya tekhnologiya, svarochnyj kompleks i poroshkovaya provoloka dlya mekhanizirovannoj podvodnoj svarki i rezki mokrym sposobom. Mir svarki, Vyp. 01, 18-20 (in Russian).
6. **Kononenko V.YA., Rybchenkov A.G., 1994.** Opyt mokroj mekhanizirovannoj svarki samozashchitnymi poroshkovymi provolokami pri remonte pod vodoj gazo- i nefteprovodov. Avtomaticheskaya svarka, Vyp.09-10, 29-32 (in Russian).
7. **Kononenko V.YA., 2005.** Tekhnologiya mokroj mekhanizirovannoj svarki pri stroitel'stve MLSP Prirazlomnaya. Avto-

- matischenkaya svarka. Vyp.09, 37-39 (in Russian).
8. **Savich I.M., Rybchenkov A.G., Pan'kov V.I., Ignatushenko A.A., Paton V.E., Smolyariko V.B., Bel'for M.G., Pichak V.G., 1976.** Avtorskoe svidetel'stvo SSSR 498131 Sposob formirovaniya korpusa sudna na plavu. Opubl. 05.01.76, BI 01 (in Russian).
  9. **Vladimir Lebedev, 2016.** Unique automatic arc for deep underwater welding wet process under hard limited. Sudochodstvo, Vyp. 02, 62-64 (in Russian).
  10. **Lebedev V.A., Gulyj M V., 2014.** Bystrodejstvuyushchij ventil'nyj elektroprivod dlya oborudovaniya mekhanizirovannoj dugovoj svarki. Mekhatronika. Avtomatizatsiya, Upravlenie, Vyp.06, 47-51 (in Russian).
  11. **Lebedev V.A., Gedrovich A.I., Borodina K.V., 2013.** Elektrodugovaya svarka plavlenniem metallov maloj tolshchiny. Sbornik tezisov stendovykh dokladov Mezhdunarodnoj konferencii Svarka i rodstvennye tekhnologii – nastoyashchee i budushchee, 25-26.11.2013, 80-81 (in Russian).
  12. **Pyotr Kulikov, Mykhailo Sukach, 2015.** O gortovnosti Ukrainy k osvoiniyu poleznykh iskopaemykh Mirovogo okeana. Underwater Technologies, Iss.02, 3-10 (in Russian).
  13. **Sergey Maksimov, Alla Radzievskaya, Liudmyla Nyrkova, Switlana Osadchuk, 2021.** Corrosion resistance of welded joints made by underwater wet welding. Transfer of Innovative Technologies. Vol.4, No.1, 41-45.

### **Solving the problems of underwater mechanized and automatic arc welding of various metal structures with a wet method**

*Vladimir Lebedev*

**Abstract.** A complex of problems related to semi-automatic and automatic underwater wet welding, concerning both equipment and ways of implementation of arc process, has been considered. An analysis of existing developments in the considered field of welding has been carried out,

and the most rational designs of semi-automatic machines for welding with flux-cored electrode wire have been revealed. It is shown that the semi-automatic device with a submerged block is the most rational design; the feeding mechanism, placed in the block, has its own additional body, filled with insulating-lubricating liquid, in which the drive motor is submerged. It is noted that a peculiarity of welding-in-fusion in aqueous medium is unpleasant formation of joints on the vertical plane. The most effective ways of improving semi-automatic and automatic machines related to modulated processes and processes with controlled pulse feeding of electrode wire are presented. It is shown that lately the most effective choice of electric motor is its valve design. At the same time, the feeding mechanism in the gearless version is possible. Specially designed computerized control and regulation system is used for realization of semiautomatic machine's work cycle and the chosen algorithm of electrode wire feeding. The results of electrode wire pulse feeding application on properties of welded joints are given. It is determined that characteristics of pulse feeding (frequency, duty cycle) influence geometric characteristics of the weld, as well as strength properties, in particular yield and time resistance limits, which, among other things, is caused by reduction of nonmetallic inclusions in the weld metal and the weld zone. External types of beads welded in aqueous medium on the vertical plane are given, it is obvious that formation when using pulse and modulated modes is significantly better than when conducting electric arc process with conventional feeding of the electrode wire. The ways of further improvement of the equipment for welding in aqueous medium by a wet method are shown. One of the most promising ways to improve technical and technological capabilities of mechanized equipment for welding in aqueous medium is the creation and application of systems with combined influence on the process.

**Keywords:** mechanized underwater problem solving and automatic wet welding various metal structures.

## Stochastic Model and Method of Optimization of Operation Modes of a Group of Artesian Wells in Water Supply Systems

Andrei Tevyashev<sup>1</sup>, Olga Matviyenko<sup>2</sup>, Glib Nikitenko<sup>3</sup>

Kharkiv National University of Radio Electronics  
Lenina avenue 16, Kharkov, Ukraine, 61166

<sup>1</sup>[tad45ua@gmail.com](mailto:tad45ua@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-2846-7089](https://orcid.org/0000-0002-2846-7089)

<sup>2</sup>[olga\\_mat@ukr.net](mailto:olga_mat@ukr.net), [orcid.org/0000-0001-7492-7616](https://orcid.org/0000-0001-7492-7616)

<sup>3</sup>[gynikitenko@gmail.com](mailto:gynikitenko@gmail.com), [orcid.org/0000-0001-5954-0712](https://orcid.org/0000-0001-5954-0712)

Received 05.07.2021, accepted after revision 10.09.2021

<https://doi.org/10.32347/uwt2021.11.1501>

**Abstract.** Groups of spatially distributed wells interconnected by sections of pipelines (a common collector) supplying water to a clean water reservoir are used in water supply systems in order to provide drinking water to settlements. A group of wells together with a clean water reservoir is called a water intake facility of the water supply system. Further, water is supplied from the clean water reservoir to consumers in settlements by means of second stage pumping stations. In terms of each well the operating mode of the submersible pumping unit, i.e. the position of its operating point at a fixed moment in time, depends on the actual values of many internal and external factors: dynamic water level in the well; the actual characteristics of the pumping unit; the position of the final control elements (drive speed, opening degree of the regulating valve); hydraulic resistances of pipeline sections of the water intake facility; the water level in the clean water reservoir; the number and operating modes of pumping units in other wells of the water intake facility.

The paper describes a deterministic model of a water intake well. At the same time, the processes of water consumption are random processes, since they depend on many uncontrolled and unmanageable factors. The parameters of the technological equipment of the water intake facility are also random values, since they are estimated from experimental data of finite length.

Therefore, a stochastic model of a water intake well is also proposed. A model of a quasi-stationary operation mode of a water intake facility,



**Andrei Tevyashev**  
Head of the department of applied mathematics  
Dr.Tech.Sc, Prof.



**Olga Matviyenko**  
Associate professor of the department of applied mathematics  
PhD, Ass. Prof.



**Glib Nikitenko**  
Deputy director  
Department of information technology municipal enterprise «Kharkivvodokanal»

ty, which is used to optimize the operation of a group of artesian wells operating on a common collector, is considered.

**Keywords:** artesian well; water supply system; optimization; stochastic model, pumping unit, water intake facility.



## INTRODUCTION

Water supply to large cities is carried out, as a rule, from surface water bodies - lakes, storage lakes, large rivers, that is, from sources with significant water reserves. In this case, the water supply scheme includes: first stage pumping stations, which take water directly from the surface water bodies; water treatment (purification) system; second stage and third stage pumping stations, which pump clean water over long distances and deliver it to settlements.

In case the settlement is located in an area where there are no large open water sources, or the geographical position of the settlement allows the use of groundwater, in this case, artesian wells are used as a source of water supply. Usually small settlements are supplied with water from artesian wells. Artesian wells are widely used for water supply to villages, industrial water supply, for irrigation (irrigation systems), in the mining industry, for lowering the level of groundwater. The advantage of using artesian wells to supply the population with drinking water is that water is extracted from great depths and purified using natural filters. Thus, the cost of water treatment is significantly reduced. The disadvantages of using artesian wells are usually low well productivity, a strong dependence of the well water volume on climatic and weather conditions, well depletion as a result of large-scale construction projects or the extraction of natural resources, such as shale gas.

ANALYSIS OF RECENT RESEARCH  
AND PUBLICATIONS

In the [1] scientific paper, the mutual influence of a group of interacting wells is considered to assess their productivity. The model of a group of wells is based on the analysis of the distances between them and is implemented in the SUMULINK environment. These studies are useful for well design, but they do not consider the possibility of optimizing the operation of a group of wells.

The [2] scientific paper solves the problem of determining the optimal set of operating

equipment, but does not take into account two-zone or three-zone tariffs for electricity.

The [3] scientific paper considers the optimization of the operation of a group of wells for a two-zone tariff for electricity by turning on/off the pumps, but does not investigate the influence of the pumps on each other during simultaneous operation.

In the [4] scientific paper, the operation of the well is optimized by changing the pump suspension height. However, such measures are suitable for one well and will be technically difficult to implement for a group of wells.

In the [5] scientific paper, methods for optimizing well performance based on monitoring well parameters and real-time control are considered. These results are important for highly sophisticated wells. In addition, the research is devoted to oil wells. For artesian water wells, such methods would be too costly.

In the [6] scientific paper, operation of a group of wells is considered, the optimization is carried out in terms of the well rate.

All of the above mentioned scientific papers are devoted to modeling and optimization of well operation, but each has its own approach to solving this problem.

In this paper, we propose the following approach to optimizing the operation of a group of artesian wells: choosing the optimal operating mode of the entire system by calibrating the pumping units on the wells to achieve their coordinated operation.

## THE AIM OF THE STUDY

The purpose of the scientific paper is to build a stochastic model of quasi-stationary operation modes of the water-intake facility and use the resulting model to optimize its operation.

The following tasks were solved in the furtherance of this purpose:

- formulation of a deterministic mathematical model of an artesian well;
- formulation of a stochastic mathematical model of an artesian well;
- formulation of a stochastic model of the water-intake facility operation;

- development of a method for optimizing the operating modes of a water-intake facility with artesian wells;
- carrying out a computational experiment in order to optimize the operating modes of the water-intake facility with artesian wells.

### RESULTS OF THE RESEARCH

Individual water-intake wells are widely used in individual farms. Productive efficiency of individual wells becomes insufficient for providing water to settlements, therefore, groups (clusters) of spatially distributed wells are used in water supply systems, interconnected by sections of pipelines (a common collector), supplying water to a filtered-water reservoir (FWR). A group of wells together with an FWR is called a water-intake facility (WIF) of the water supply system (WSS). Further, water is supplied to consumers in settlements from the FWR by second stage pumping stations (PS). The operating mode of the pumping unit (PU), that is, the position of the operating point at each moment of time in each well depends on the actual values of many internal and external factors: dynamic water level in the well; actual characteristics of a PU; the position of the regulating bodies (drive speed, opening degree of the control valve); hydraulic resistances of the air intake pipelines sections; water level in the FWR; the number and modes of a PU operation in other wells of the WIF. [7 – 10].

#### Deterministic water well model

Electrical centrifugal water pumping (ECWP) units are widely used for water supply from wells. Without loss of generality, let us consider the main characteristics of these units. ECWP units are designed to supply water from wells: with total salinity (dry residue) of max. 1500 mg / l; with a hydrogen index (pH) from 6.5 to 9.5; with temperatures up to 25 °C; with 0.01% (100 g/m<sup>3</sup>) mass fraction of solid mechanical impurities; max. 350 mg/l chloride content; max. 500 mg/l sulfates, 1.5 mg / l hydrogen sulfide. The units can be used for municipal, industrial and agricultural water

supply, for irrigation, lowering the groundwater level and for daily living needs. The unit size designation includes the ECWP letters, which mean: E – driven by a submersible electric motor; C – centrifugal; WP – for water pumping (supply) plus numbers, for example ECWP 8-40-90, consecutively indicating: 8 – allowable casing string diameter in inches (diameter in mm, reduced 25 times and rounded, i.e.  $8 * 25 = 200\text{mm}$ ; 40 – nominal flow rate (in m<sup>3</sup>/ h); 90 – pressure (in m) corresponding to the nominal flow. Pumping units are manufactured in three versions:

- ECWP unit in standard design;
- ECWP unit with the letter S (body parts made of stainless steel);
- ECWP with the letters SSI (body parts made of stainless steel, impellers made of stainless steel, graphite thrust bearing).

Specifications for ECWP 8-40-90. Minimum allowable well Casing string diameter in inches (diameter in mm, reduced 25 times and rounded) – 8 "(inches). Rated water supply is 40 m<sup>3</sup>/h. Nominal water pressure (clearance height) is 90 m. Rated power is 16 kW. Rated current is 36 A. Unit weight is 104 kg. Pump length is 1600 mm. Number of pump stages is 8. Connection method is a steel pipe according to GOST 8732-78 108 \* 8, outer diameter 108.0 mm, pipe wall thickness 8.0 mm. The units operate in continuous mode from a 3-phase alternating current network with 380 V voltage and 50 Hz frequency.

The PU consists of a centrifugal pump and a submersible electric motor. There is a mesh, that serves to retain large particles contained in the pumped out water, on the suction part of the unit. Each stage (section) of the pump consists of a cage, an impeller and a vane outlet. The position of the impellers on the shaft is fixed with keys, spacers and protective sleeves. The pump shaft rotates in radial plain bearings, which are lubricated by the pumped water. A check valve is located in the upper part of the pump, which serves to retain the liquid column in the riser pipes when the pump stops and ensures a smooth start during repeated starts. The diagram of a pumping unit installation in the well is shown in Fig. 1 [14].

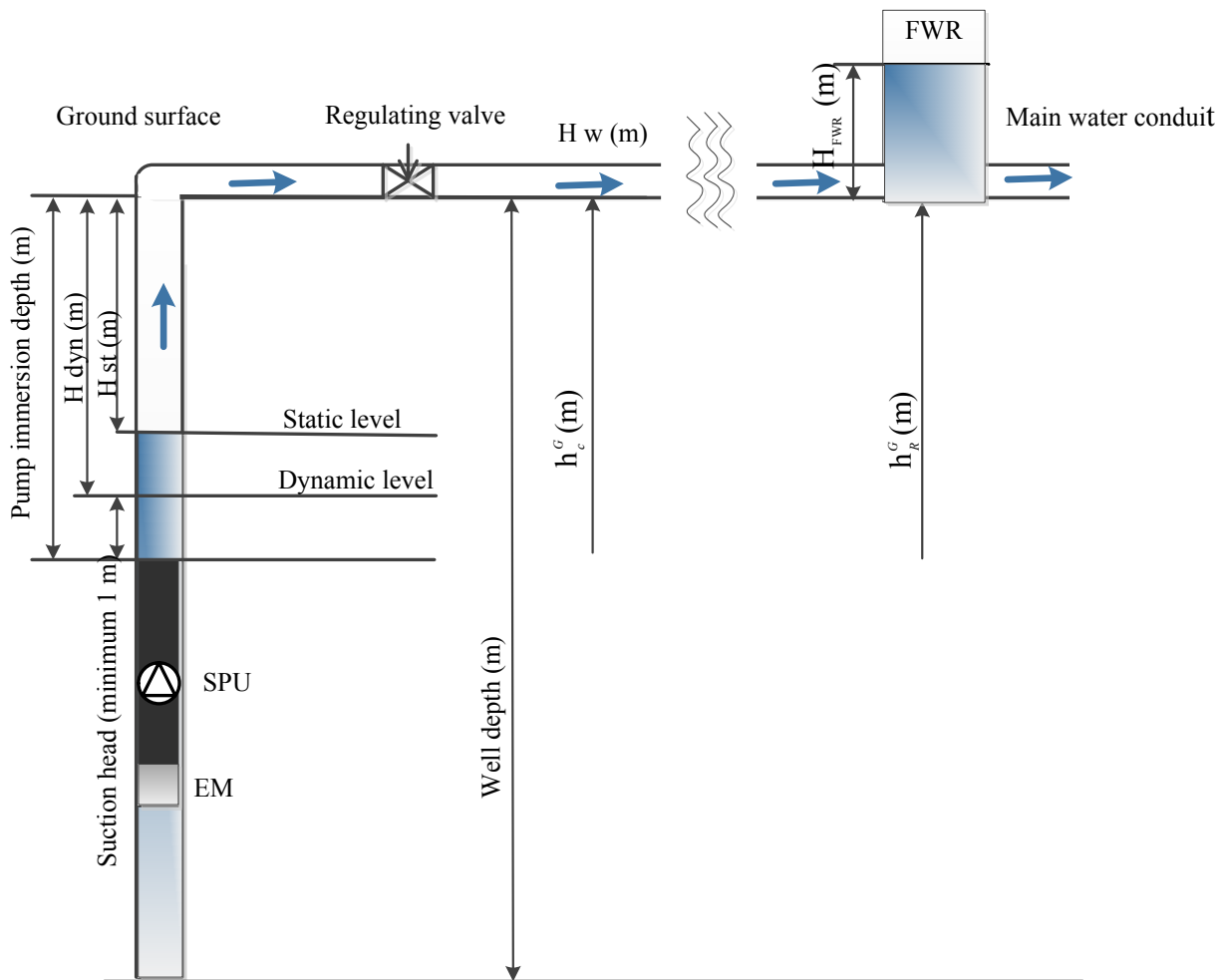


Fig. 1. The diagram of a pumping unit installation in the water-intake well

The Fig.1 has the following designations:

FWR – filtered-water reservoir, SPU – submersible pumping unit, CP- centrifugal pump, SEM – submersible electrical motor;  $l_{SPU}$  – SPU length; RV – regulating valve; the geodesic marks, respectively, are the following: mouth (ground surfaces) of a water-intake well –  $h_c^G$ , CP –  $h_{CP}^G$ ; FWR –  $h_r^G$ , well depth –  $h_w$ , SPU immersion (installation) depth –  $h_{SPU}$ ; pressure: at the outlet (mouth) of the water intake well –  $H_w$ ; pressure developed by a CP –  $H_{CP}$ ; water levels: in a FWR –  $H_{FWR}$ ; static level in the well (with zero water withdrawal) –  $H_{st}$ ; dynamic level in the well (at nominal water withdrawal) –  $H_{dyn}$ ; CP suction head level –  $H_{CP}^h$ .

When constructing a deterministic mathematical model of a water-intake well, it is assumed that all parameters of a water-intake well are known a priori. This allows you to determine the model of the water-intake well operation in the form of an interconnected system of algebraic equations of the following type:

CP geodesic mark:

$$h_{CP}^G = h_c^G - h_{SPU}^G - 0,5l_{SPU}. \quad (1)$$

CP suction head level:

$$H_{CP}^h = h_{CP}^G - H_{dyn}. \quad (2)$$

Pressure developed by a CP:

$$H_{CP}(Q) = a_0 + a_1 \cdot Q + a_2 \cdot Q^2. \quad (3)$$

CP power expenditure:

$$N_{CP}(Q) = c_0 + c_1 \cdot Q + c_2 \cdot Q^2. \quad (4)$$

CP efficiency coefficient:

$$\eta(Q) = d + d \cdot Q + d \cdot Q, \quad (5)$$

where  $Q$  – water consumed through a CP,  $a_0, a_1, a_2, c_0, c_1, c_2, d_0, d_1, d_2$  – numerical values of a CP parameters. The pressure loss  $H$  in the pipeline section  $H = H(Q)$  is determined by the following expression

$$H(Q) = \text{sgn}(Q) \cdot \varphi \cdot |Q|^\chi. \quad (6)$$

where  $Q$  – water flow through the pipeline section [ $\text{m}^3 / \text{sec}$ ];

$\text{sgn}(Q)$  –  $Q$  sign;  $\varphi > 0$  – hydraulic resistance of a pipeline section;  $\chi > 0$  – K-rating factor.

The RV pressure loss in the H pipeline section is the following

$$H_V = \frac{C}{E_V^2} \text{sgn}(Q) \cdot |Q|, \quad (7)$$

where  $C$  – equivalent hydraulic resistance of the P3 in the "open" position;

$E_V \in (0, 1]$  – RV opening level, where  $E_V = 1$  in the "open" position;  $E_V = 0$  in the "close" position.

If the value of the water flow rate through the CP  $Q$  is known, then the pressure value at the outlet (mouth) of the well is determined by the following expression

$$H_w = H_{CP}^h + H_{CP} - H - H_V. \quad (8)$$

Also, there are following relations:

$$H_{CP}^h \geq 1m, \quad (9)$$

$$H_{st} \leq H_{dyn} \leq h_{SPU}. \quad (10)$$

### Stochastic model of a water well

Water consumption processes are random processes, as they depend on many unmanageable and uncontrollable factors. The parameters of the WIF technological equipment are also random values, since they are estimated from experimental data of finite length [6]. We introduce a number of designations in order to construct stochastic models of the WIF technological elements: let us take  $(\Omega, B, P)$  – as Descartes's product probability space  $(\Omega_i, B_i, P_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $\Omega = \Omega_1 \times \Omega_2 \times \dots \times \Omega_n$ ,  $B = B_1 \times B_2 \times \dots \times B_n$ ,  $P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$ , where  $\Omega_i$  – sample space;  $B_i$  –  $\sigma$  – algebra of events from  $\Omega_i$ ;  $P_i$  – probability measure at  $B_i$ ) [11 – 13]. Then the stochastic model of the water-intake well has the following form:

$$H_w(\omega) = H_{CP}^h(\omega) + H_{CP}(\omega) - H(\omega) - H_V(\omega). \quad (11)$$

$$H_{CP}(Q(\omega)) = a_0(\omega) + a_1(\omega)Q(\omega) + a_2(\omega)Q^2(\omega). \quad (12)$$

$$H(Q(\omega)) = \text{sgn}(Q) \cdot \phi(\omega) \cdot |Q(\omega)|^\chi \quad (13)$$

$$H_V(\omega) = \frac{C(\omega)}{E_V^2} \text{sgn}(Q) \cdot |Q(\omega)| \quad (14)$$

$$H_{CP}^h(\omega) = h_{CP}^h(\omega) - H_{dyn}(\omega). \quad (15)$$

### Stochastic model of a WIF

In mathematical modeling and optimization of the WIF operation modes, we will use a stochastic model of the quasi-stationary WIF operating modes [7 – 9].

We will represent the WIF structure in the form of the  $G(V, E)$  digraph, where  $V$  – is the set of vertices,  $E$  – is the set of arcs ( $e = \text{Card}(E)$ ,  $v = \text{Card}(V)$ ), the real WIF is supplemented by a zero vertex and fictitious chords that connect vertex zero with all inputs (wells) and its output (FWR).

Let us consider a WIF with several artesian wells (Fig.2).

The following WIF coding is done for the mathematical formulation of the problem: the graph tree is chosen so that the fictitious sections of the network become chords, while the real sections become partly chords and partly branches of the tree. The branches of a tree with a pump are assigned number 1, other branches are assigned from 2 to  $v-1$ , the chords of real sections are assigned from  $v$  to  $v + \eta_2 - 1$ , the chords of fictitious sections are assigned with given nodal flows from  $v + \eta_2$  to  $v + \eta_2 + \xi_1 - 1$ , the chords of fictitious sections are assigned with given pressure from  $v + \eta_2 + \xi_1$  to  $e$ , where  $\eta_2$  – is the number of chords of real sections,  $\xi_1$  – is the number outputs with given nodal flow rates.

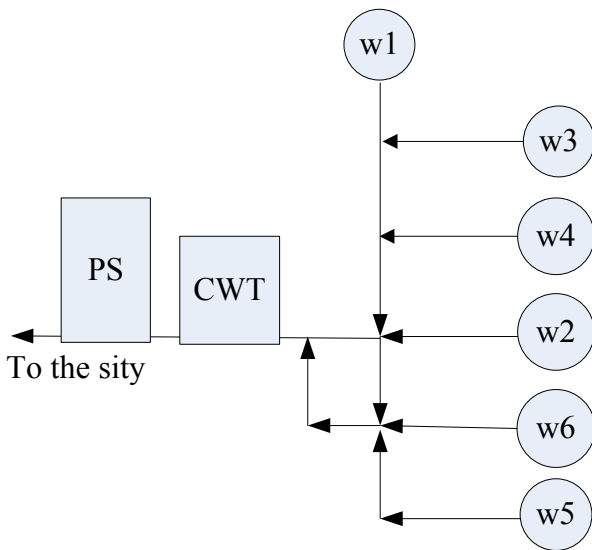


Fig. 2. WIF layout

In this case, the stochastic model of the quasi-stationary WIF operating modes will be of the following form[13]:

$$\Omega : M_{\omega} \left( H_r(Q(\omega)) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} H_i(Q(\omega)) \right) = 0, \quad (16)$$

$$(r = v, \dots, v + \eta_2 - 1),$$

$$M_{\omega} \left( h_r^c(\omega) - H_{c1}(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} H_r(Q(\omega)) + h_i^g \right) = 0, \quad (17)$$

$$(r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1),$$

$$M_{\omega} \left( H_r(Q(\omega)) + h_r^g - H_{cj}(\omega) + H_{c1}(\omega) + \sum_{i=1}^v b_{1ri} (H_i(Q(\omega)) + h_i^g) \right) = 0, \quad (18)$$

$$(r = v + \eta_2 + \xi_1, \dots, e; j = 1, \dots, n),$$

$$M_{\omega} (q_i(\omega)) = M_{\omega} \left( \sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{1ri} Q_r(\omega) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{1ri} Q_r(\omega) \right), \quad (19)$$

$$(i = 1, \dots, v-1).$$

$$P \left( h_i^c(\omega) \geq h_i^+ \right) \geq \alpha, \quad (\alpha \cong 1), \quad (20)$$

$$i = (v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1),$$

$$P(Q_i(\omega) > 0) \cong \beta, \quad (\beta \cong 1), \quad i \in N, \quad (21)$$

$$H_{wj}(\omega) = H_{CPj}^h(\omega) + H_{CPj}(\omega) - H_j(\omega) - H_{Vj}(\omega), \quad (j = 1, \dots, n). \quad (22)$$

$$H_{CPj}(Q_j(\omega)) = a_{0j}(\omega) + a_{1j}(\omega) Q_j(\omega) + a_{2j}(\omega) Q_j^2(\omega), \quad (j = 1, \dots, n). \quad (23)$$

$$H_k(Q_k(\omega)) = \text{sgn}(Q_k) \cdot \phi_k(\omega) \cdot |Q_k(\omega)|^x. \quad (24)$$

$$k = (1, \dots, v + \eta_2 - 1) \cup (v + \eta_2 + \xi_1, \dots, e).$$

$$H_{Vj}(\omega) = \frac{C_j(\omega)}{E_{Vj}^2} \text{sgn}(Q_j) \cdot |Q_j(\omega)|. \quad (25)$$

$$(j = 1, \dots, n).$$

$$H_{CPj}^h(\omega) = h_{CPj}^G(\omega) - H_{dynj}(\omega). \quad (26)$$

$$(j = 1, \dots, n),$$

where random variables characterize the following:  $Q_j(\omega)$  – water consumption at the  $j$ -section of the pipeline;  $h_r^c(\omega)$  – free pressure

in the WIF  $r$ -node ( $r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1$ );  $h_r^+$  – the minimum admissible pressure in the WIF  $r$ -node;  $h_i^g$  – geodetic mark of the  $i$ -section of the pipeline ( $i \in M$ );  $b_{1ri}$  – element of the cycloomatic matrix;  $H_{w1}(\omega)$  – pressure at the output of the 1st source;  $H_{wj}(\omega)$  – pressure at the output of the  $j$ -source ( $j = 2, \dots, n$ );  $n$  – is the number of wells.

We will use this WIF mathematical model to simulate and optimize the WIF operating modes.

### Stochastic model of the task on optimizing the WIF operating modes

When a group of wells is operating on a common reservoir, a specific problem arises: pumping units on wells can operate in such a way that one pump is "squeezed" by another, which reduces the productivity of the entire WIF. To solve this problem, it is necessary to optimize the WIF operation.

We take the total water supply by all the WIF wells as a criterion by which we will optimize the WIF operation.

In words, the problem of optimizing the WIF operating modes can be formulated as follows: it is necessary to determine the parameters of the WIF processing equipment, at which the total water supply by all the WIF wells at a given control interval  $[0, T]$  will be maximum. The parameters of the technological equipment that we will take into account are as follows: the operating points of the pumping units (flow and head), the immersion depth of the pumping units, and whether the pumping unit is turned on or off for a certain period of time [15 – 18].

The initial data for the task of optimizing the WIF operating modes are as follows: the control interval  $[0, T]$  (one day), which is divided into 24 subintervals corresponding to each hour of the control period  $k = 0, \dots, 23$ . At each  $k$ -subinterval of time, the measured values of the water levels in the FWR are known; the actual number of pumping units (PU) switched on, and static data: the WIF

structure lengths, diameters, geodetic marks of the pipeline sections, estimates of the parameters of the PU models at each well, the FWR

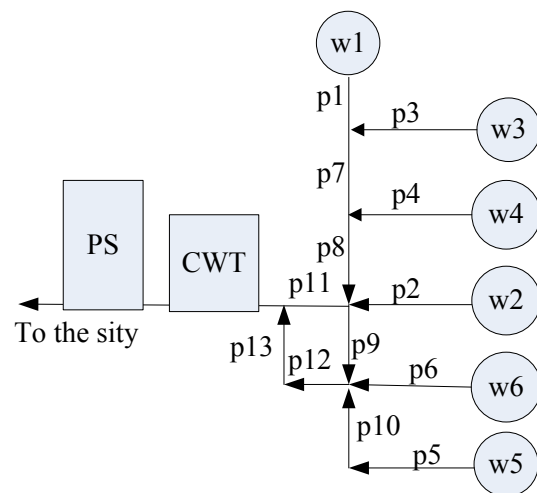


Fig. 3. WIF design diagram (p 1-13 mean a pipeline section, w1-6 mean wells)

physical dimensions [19 – 20].

The objective function of the problem on optimizing the WIF operating modes per day can be represented in the form of the mathematical expectation of the total water supply by all the WIF wells on the control interval  $[0, T]$ :

$$M \sum_{\omega} \sum_{k=0}^{23} \sum_{i=1}^n Q_{wik}(\omega) \rightarrow \max_{u(k) \in \Omega}, \quad (27)$$

where  $n$  – number of wells,  $u(k)$  – control vector. The  $\Omega$  area of restrictions is determined by a stochastic model of quasi-stationary WIF operating modes (16) – (26).

### An example of a WIF operation simulator investigation

As an example, consider a WIF consisting of six artesian wells, a reservoir of clean water, a second stage pumping station and pipeline sections, the design diagram of which is shown in Fig. 3.

Table 1 – 3 shows a specification the artesian wells.

**Table 1.** Specification of the artesian wells

Parameters	Well No					
	1	2	3	4	5	6
Diameter, mm	200	200	200	200	200	200
Depth, m	26	26	26	21,5	21,5	20
Static level depth, m	3	2	3	4	4	4,5
Depth of the pump immersion, m	17	15	20	18	18	18
Potential flow, m <sup>3</sup> / h	30	35	20	25	25	25
Pump type	ECWP unit 8-40-90	ECWP unit 8-25-100	ECWP unit 8-40-90	ECWP unit 8-40-90	ECWP unit 8-40-90	ECWP unit 8-40-90
Electric motor type	SEM 8-17	SEM 6-11	SEM 8-17	SEM 8-17	SEM 8-17	SEM 8-17
Unit efficiency,%	82	82	82	82	82	82
Geodetic mark of the well mouth, m	117,22	119	117,25	117,7	118	118,2
Geodetic mark of the pumping unit, m	97	104	97	100	100	100
H inlet, m ("level in the tank")	14	14	17	13	14	13,5

**Table 2.** Specification of the pipeline sections

Pipeline section	Diameter, mm	Length, m	Geodetic mark of the beginning of the section, m	Geodetic mark of the finish of the section, m
p1	100	76,73	117,22	117,3
p2	100	36,92	119	118,5
p3	100	27,24	117,25	117,3
p4	100	16,63	117,7	118,35
p5	100	49,33	118	118,5
p6	100	74,3	118,2	118,5
p7	200	44,31	118,35	118,5
p8	300	194,88	118,5	118,5
p9	500	77,25	118,5	118,5
p10	500	10	118,5	118,5
p11	300	13800,71	118,5	105
p12	300	13311,59	118,5	105
p13	300	15	105	105

**Table 3.** Specification of the FWR

FWR volume, m <sup>3</sup>	1000
Geodetic mark of the bottom, m	106
Maximum water level, m	5
Minimum water level, m	1

### Calculation results

Tables 4 – 6 show the WIF parameters for various WIF operating modes.

**Table 4.** WIF parameters for various operating modes

FWR initial level of 1,5 m					
All the wells operate	Pressure after the PU, m	Consumption in wells, m <sup>3</sup> /h	Consumption in water pipeline 1 before the FWR, m <sup>3</sup> /h	Consumption in water pipeline 2 before the FWR, m <sup>3</sup> /h	FWR inflow, m <sup>3</sup> /h
Well 1	75,59	46,52	134,51	132,16	266,67
Well 3	74,00	47,32			
Well 4	73,04	47,35			
Well 2	71,61	33,35			
Well 6	75,59	45,64			
Well 5	74,60	46,48			

**Table 5.** WIF parameters for various operating modes

FWR initial level of 3,75 m					
All the wells operate	Pressure after the PU, m	Consumption in wells, m <sup>3</sup> /h	Consumption in water pipeline 1 before the FWR, m <sup>3</sup> /h	Consumption in water pipeline 2 before the FWR, m <sup>3</sup> /h	FWR inflow, m <sup>3</sup> /h
Well 1	79,70	44,15	125,62	127,86	253,48
Well 3	78,27	44,91			
Well 4	77,35	44,91			
Well 2	75,96	32,12			
Well 6	79,59	43,29			
Well 5	78,73	44,10			

**Table 6.** WIF parameters for various operating modes

FWR initial level of 4,89 m					
All the wells operate	Pressure after the PU, m	Consumption in wells, m <sup>3</sup> /h	Consumption in water pipeline 1 before the FWR, m <sup>3</sup> /h	Consumption in water pipeline 2 before the FWR, m <sup>3</sup> /h	FWR inflow, m <sup>3</sup> /h
Well 1	80,05	43,94	127,29	125,06	252,34
Well 3	78,62	44,70			
Well 4	77,71	44,70			
Well 2	76,32	32,01			
Well 6	79,93	43,09			
Well 5	79,08	43,90			



The Tables 4 - 6 show how the WIF parameters change for different initial water levels of the FWR. The lower the initial water level of the FWR, the greater the water supply by the wells (water inflow into the FWR) and the lower the pressure at the PU outlets. One of the ways to further optimize the WIF operation could be the use of a three-zone tariff for electricity and the use of the FWR capacity in a wider range [8]; however, the results obtained cast doubt on the feasibility of such an approach. This will be the focus of further research.

#### DISCUSSION OF THE RESULTS OF THE STUDY

As a result of handling the challenge of optimizing the WIF operating modes, such a mode of the WIF operation and such parameters of the technological equipment were found, in which the pumping units in the wells do not "strangle" each other, but coherently operate, while the water supply to the WIF is maximum. The calculation results given in Tab. 4 – 6, show the WIF optimal operating mode, i.e. operating points of pumping units on wells (columns 2, 3) and the maximum water supply to the WIF (column 6) at different water levels in the FWR.

#### CONCLUSIONS

A stochastic model of the WIF operation modes is developed in this scientific paper. The problem of optimizing a WIF operation modes, which consists in the fact that it is necessary to find such a WIF operation mode and such parameters of the technological equipment so that the water supply to the WIF is maximum, was formulated and solved based on this stochastic model. The calculation example shows all the initial data for the problem and the results of calculations.

#### REFERENCES

1. **Zamyatin N.V., Ivanov E.O., 2011.** Automation of calculating the productivity of pressure head artesian wells in the Simulink environment. Management, computer technology and informatics. TUSUR reports, No.2 (24), Part 3, 154-158 (Russian).
2. **Zamyatin N.V., Ivanov E.O., 2015.** Fuzzy advising control system for artesian wells. Management, computer technology and informatics. TUSUR reports, No.4 (38), 178-181 (Russian).
3. **Marugin A.P., Sadovnikov M.E., 2001.** System of dispatching control and control of pumps of artesian wells. Bulletin of the Ural State Mining University, No.12, 101-104 (Russian).
4. **Polishchuk C. I., Kutran I. S., 2011.** Saving electricity in artesian water supply systems. Energy Saving Technologies. Energy saving. Energy. Energy audit, No.5 (87), 79-82 (Russian).
5. **Jinlon Wang, Zolotukhin A.B., Zhou Qiaofeng, Ibragimov Zh.Zh., Zhang Ningsheng, 2018.** Optimization of high-tech wells. Neftegaz.RU, No.6, 39-45 (Russian).
6. **Grava A., Rotiroti M., Fumagalli L., Bonomi N., 2016.** Optimization of Well System Using the Ground Water Management Package of MODFLOW-2000. Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca, Piazza della Scienza, No.39, 101-104.
7. **Teviashev A. D., Matvienko O. I., 2014.** About one Approach to Solve the Problem of Management of the Development and Operation of Centralized Water-Supply Systems. Econtechmod. An International Quarterly Journal, Vol.3 (3), 61-76. DOI: [10.15587/1729-4061.2015.55469](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55469).
8. **Teviashev A.D., Matvienko O. I., 2015.** Mathematical Model and Method of Optimal Stochastic Control of the Modes of Operation of the Water Main. East-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.6/4(78), 45-53.
9. **Tevyashev A., Matviyenko O., Nikitenko G., 2019.** Construction of a Stochastic Model for a Water Supply Network with Hidden Leaks and a Method for Detecting and Calculating the Leaks. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.6/4 (102), 29-38.
10. **Krishna Kayastha, 2015.** Application of bell type water well with wide gravel filter. Underwater Technologies: Industrial and Civil Engineering, Vol.01, 65-76.

11. **Tevyashev A., Matvienko O., 2016.** Estimation of the potential of resource and energy saving in the management of development and functioning of water main. *Underwater Technologies*, Vol.04, 26-37 (Russian).
12. **Tevyashev A., 2018.** Information and analytical technology for optimal management of sustainable development and functioning of water supply systems. *Underwater Technologies*, Vol.08, 47-49 (Russian).
13. **Tevyashev A., Matvienko O., Nikitenko G., 2021.** Stochastic model and optimization method for robotic groups of artesian deep holes in water supply systems. *Transfer of Innovative Technologies*, Vol.4, No.1, 108-110 (Ukrainian).
14. **Leznov B.C. 2006.** Energy saving and adjustable drive for pump and blower installations. Moscow. *Energoatomizdat*, 358 (Russian).
15. **Novohatny B., Kostenko S. 2013.** Reliability of water supply conduits. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture Polish Academy of Sciences University of Engineering and Economics in Rzeszow. Lublin-Rzeszow. Vol.15, No.6, 101-109.*
16. **Pulido-Calvo I. Gutiérrez-Estrada J. C. 2011.** Selection and Operation of Pumping Stations of Water Distribution Systems. *Environmental Research Journal*, Nova Science Publishers, 1-20.
17. **Ruuskanen A. 2007.** Optimization of Energy Consumption in Wastewater Pumping. *Lappeenranta University of Technology Department of Energy- and Environmental Technology*, 99.
18. **Saliev E. 2013.** Reliability of the Functioning of the Water Supply and Sewerage System. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture Polish Academy of Sciences University of Engineering and Economics in Rzeszow. Lublin-Rzeszow. Vol.15, No.5, 53-61.*
19. **Steinbach M.C. 2001.** General Information Constraints in Stochastic Programs. Berlin: ZIB, 5.
20. **Steinbach M.C. 2001.** Tree-Sparse Convex Programs. *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, ZIB-Report*, 22.

### Стохастическая модель и метод оптимизации режимов работы группы артезианских скважин в системах водоснабжения

*Андрей Тевяшев, Ольга Матвиенко,  
Глеб Никитенко*

**Аннотация.** Для обеспечения питьевой водой населённых пунктов в системах водоснабжения используют группы пространственно распределённых скважин, объединённых между собой участками трубопроводов (общим коллектором), подающим воду в резервуар чистой воды. Группа скважин совместно с резервуаром чистой воды называется водозаборным узлом системы водоснабжения. Далее из резервуара чистой воды насосными станциями второго подъёма вода подаётся потребителям в населённые пункты. Режим работы погружного насосного агрегата, т.е. положение его рабочей точки в фиксированный момент времени, для каждой скважины зависит от фактических значений множества внутренних и внешних факторов: динамического уровня воды в скважине; фактических характеристик насосного агрегата; положения регулирующих органов (оборотов привода, степени открытия регулирующей задвижки); гидравлических сопротивлений участков трубопроводов водозаборного узла; уровня воды в резервуаре чистой воды; количества и режимов работы насосных агрегатов в других скважинах водозаборного узла.

В работе дана детерминированная модель водозаборной скважины. В то же время процессы водопотребления являются случайными процессами, поскольку зависят от многих неконтролируемых и неуправляемых факторов. Параметры технологического оборудования водозаборного узла также являются случайными величинами, так как оцениваются по экспериментальным данным конечной длины.

Поэтому предложена также стохастическая модель водозаборной скважины. Рассмотрена модель квазистационарного режима работы водозаборного узла, которая используется для оптимизации работы группы артезианских скважин, работающих на общий коллектор.

**Ключевые слова:** артезианская скважина; система водоснабжения; оптимизация; стохастическая модель, насосный агрегат, водозаборный узел.

## Trends in the development of systems for monitoring the state of water bodies and the development of a Geo-information system Dniester on the basis of an industrial IoT

Leonid Zamikhovskiy<sup>1</sup>, Olena Zamikhovska<sup>2</sup>, Mykola Nykolaychuk<sup>3</sup>, Ivan Levitskiy<sup>4</sup>

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
Karpatska, street 15, Ivano-Frankivsk, 76019

<sup>1</sup>leozam@nung.edu.ua, orcid.org/0000-0002-6374-8580

<sup>2</sup>elenazam@meta.ua, orcid.org/0000-0003-0775-0472

<sup>3</sup>nmj\_2010@ukr.net, orcid.org/0000-0001-6185-2272

<sup>4</sup>letis@ukr.net, orcid.org/0000-0001-6538-7734

Received 11.04.2021, accepted after revision 25.05.2021

<https://doi.org/10.32347/uwt2021.11.1502>

**Abstract:** The work shows that inadequate and untimely hydrological forecasting of the level of flood development leads to significant annual economic damage and loss of life. The latter requires constant control and monitoring of the state of water bodies, which is possible with modern automated control and monitoring systems. The analysis showed that the information and measurement systems (AIMS) for flood control, which are operated in Ukraine, their quantity, cost and technical characteristics do not provide the information necessary for predicting the development of floods.

Analysis of trends in the development of systems for automated control and monitoring of the state of water bodies showed that modern foreign systems that are at the stage of development or testing are based on the use of microcontrollers, "smart" converters of physical quantities, modern communication systems and Internet of Things technology, as well as the use of smartphones with a Raspberry Pi camera for determining the water level in rivers.

The development with the use of the industrial Internet of Things of the basic version of the geoinformation system for control and monitoring of the state of water bodies GIS-Dniester is given. The structure, components and functions of GIS-Dniester are considered. The tasks of organizing hardware and software for parameterizing and diagnosing "smart" converters, establishing a communication environment for industrial communication, developing algorithms for collecting, processing and transmitting data, studying the characteristics of measuring signals are being solved. The results of



**Leonid Zamikhovskiy**

Head of the department of cybersecurity and computer engineering  
Dr.Tech.Sc, Prof.



**Olena Zamikhovska**

Professor of the department of cybersecurity and computer engineering  
Dr.Tech.Sc, Snr.Res.Ass.



**Mykola Nukolaychuk**

Head of the department of cybersecurity and computer engineering  
Dr.Tech.Sc, Prof.



**Ivan Levitskiy**

Professor of the department of cybersecurity and computer engineering  
Dr.Tech.Sc, Snr.Res.Ass.

the study of the echo profiles of the XPS10 ultrasonic level sensor with "smart" -converters Multi-ranger 100, as well as the procedure for working

with the GIS-Dniester are presented. The use of the developed GIS-Dniester has shown its effectiveness and reliability in operation.

**Keywords:** geo-information system, industrial IoT, monitoring, flood control, microcontroller.

### INTRODUCTION

Monitoring the state of water bodies is one of the main tasks of the modern development of the state. This is due to the fact that insufficient and untimely hydrological forecasting of the level of development of floods (floods), floods, mudflows, as well as the lack of a modern, full-fledged and integral protective complex lead to annual losses in the agricultural, industrial and social sectors of the economy, as well as human casualties.

There is practically no territory of the state where the negative impact of floods is not felt from time to time. Over the past 25 years, significant floods that led to emergencies were observed in 1995, 1997, 1998, 2001, 2008, 2019, 2020. As a result of the flooding of territories, for example, in the Ivano-Frankivsk region in 2000-2008, economic facilities and the population of the region were damaged in the total amount of more than 520 million. UAH.

At the same time, an increase in the accuracy of hydrological forecasting of both the level of flood development and the quality of work on accounting for land surface waters is possible if modern automated control and monitoring systems are available not only for the river water level, but also for other hydrological parameters. Hydrological posts should be equipped with such systems, which are developed on the basis of modern hardware and software. Today in Ukraine there is a significant number of different systems for monitoring the state of rivers, which are equipped with hydrological posts. Most of the systems have been developed by foreign firms on an element base, which are now outdated, and some of the systems are inoperable. Also known are some innovative developments of Ukrainian companies in the field of automation of systems for collecting information on the state of water bodies. At the same time, there is no information on the efficiency of operation of these systems, and the main development trends and requirements for modern

control and monitoring systems for the state of water bodies have not been identified.

### THE AIM OF THE STUDY

The purpose of the research is to determine the main trends in the development of systems for automated control and monitoring of the state of water bodies and the requirements for their structure and the development of a geoinformation system (GIS) for monitoring the state of river waters based on modern hardware and software, industrial Internet of things technology and research of one of the main sensors of the system. – XPS10 ultrasonic level sensor.

### RESULTS OF THE RESEARCH

Modern GIS are located at hydrological posts and automatically transmit a set of parameters characterizing the hydrological characteristics of a water body (water level, water and ambient temperature, air humidity, atmospheric pressure, river flow velocity, chemical indicators, etc.). In this case, information about the specified parameters can be transmitted continuously or at regular intervals.

In [1], the existing methods and systems for forecasting the level of flood waters used and developed both in Ukraine and abroad are considered and analyzed. Automated control methods are considered, which are subdivided into direct (level sensors, automated measuring stations), as well as remote measurement methods, namely: space (satellite survey systems); airborne (airplanes, helicopters) and constitute a significant part of remote sensing data of types of surveys, methods of obtaining data using measuring systems in conditions of physical contact with the surveyed object.

It is concluded that the insufficient level of predictability of floods, floods and flooding, as well as the lack of a modern integral complex of protective measures lead to significant annual damage in the agricultural, industrial and social sectors of the economy, deterioration of the ecological state of the environment, which is also confirmed in [2, 3]. Mathematical modeling of the flood process and methods of forecasting them based on statistical data are considered in [4]. The proposed models

take into account, as one of the components, the soil moisture of the studied river basin.

An analysis of the existing AIMS for flood water control is given in [5]. The AIMS in Ukraine, which are in working order, at the stages of development or implementation, include: "TISA", "Prykarpattya", a computer system with autonomous sensors, "AKSON", a precipitation gauge and an integrated system of nationwide flood monitoring. A brief description of these systems is given and the main disadvantages of these systems are noted: high economic costs for the development and implementation of these systems and technical means (AIIIS "Tisa" – 225 thousand Euro, 3 gauging station AIIIS "Prykarpattya" – 500 thousand UAH, AKSON – 600 thousand UAH, an integrated system of nationwide flood monitoring – 14 million 680 thousand UAH). Inadequate financing from the state does not allow the creation of a sufficient number of AIIIS, gauging stations in order to warn about the occurrence of flood waters.

In [6], information is provided on the foreign experience of using remote hydrological posts, as well as a brief historical excursion to the development of automated observation systems in Ukraine. The control and information system developed by Satellite + LLC for automatic gauging stations of the BPV series, consisting of a water level sensor, a communication channel, a recording device and a power source, is considered in detail. The system uses a set of batteries and information transmission via the GPRS channel of one of the GSM operators. The presence of batteries indicates that information is transmitted discretely, after a certain period of time. However, the work [6] does not indicate the frequency of information transmission. While the rapid development of floods requires continuous information about changes in the level of water bodies.

The work [7] presents the results of the development and operation of automated technical complexes: an automated hydrometeorological station – AGMS - (manufacturer - Tekhpribor LLC, Lviv, Ukraine) and an automatic system for hydrometeorological monitoring – Vaisala HydroMet™ MAWS100 – (manufacturer – Vaisala Oyj", Finland). It is

indicated that their introduction significantly improves the efficiency of the forecasting organizations of the hydrometeorological service, and in the case of the formation of rapid floods in mountain annual basins, it is a necessary condition and guarantee of increasing the lead time and confirming hydrological forecasts and warnings.

In [8], a system for controlling the level of flood waters is proposed, the basis of which is an ultrasonic sensor for measuring the level and other sensors. The collection and transmission of information is carried out using the Arduino Uno and a wireless sensor network based on LoRa technology. The results of testing the proposed system are presented.

The use of the early warning systems for floods in the Indian Himalayas (The Early Warning Systems – EWS) is given in [9]. The flood monitoring system and EWS consists of base stations and a control center. The base station consists of a measurement module and a processing module that performs a localized forecast of the water level and transmits the predicted results and measured data to the control center. The Control Center uses a hybrid system of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and supervised machine learning, as well as a Linear Multiple Regression (LMR) model to predict water level. This hybrid system demonstrated high accuracy of 93.53% for daily forecasts and 99.91% for initial forecasts.

A prototype of a flood warning and monitoring system is described in [10]. Structurally, the system consists of three main blocks: a telemetry data collection unit; collecting data from sensors located on the river bank; data analysis and processing unit. It also includes the development of algorithms for processing data obtained from sensors, with the issuance of appropriate warnings to the public and control messages for spillways. The system also contains an information dissemination unit, which is used to alert the population about the level of flood risk. The system uses ESP32 development boards to collect data from sensors of precipitation, flow and water level in the river, which are integrated into an IoT monitoring system to transfer raw data using 4G devices connected to an ESP microcontroller.

End users are also offered an Android app to track flood risk situations in real time. The above experimental results demonstrate the reliability of flood forecasting.

The use of the Internet of Things for monitoring the behavior of the state of the river, including the development of the IWT hardware (RiverCore), is discussed in [11]. A description of the developed web-based data collection platform integrated with IoT technologies for data transmission over 3G cellular networks is given. The developed architecture uses the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol along with encryption and security mechanisms to send data packets in real time to the server, and stores the received data in a non-relational database. From there, the data can be accessed and displayed using a variety of query settings and graphical representations, which allows it to be used in the future in the flood analysis and forecasting system.

Flood Prediction Using Sensor Integrated based on Internet of Thing and Radio Frequency to Solve Environmental Issue (FRESTI) is described in [12]. The need to develop such a system for Indonesia is due to the fact that in 2015-16 there were 500 floods due to which in 2015 115 people died and 317,683 people were displaced from flooded areas, and in 2016 75 people died and 105,301 people were displaced. The early flood detection function of FRESTI is achieved with built-in rain sensor, water flow, river slope and water level sensors. The measured parameters will allow assessing potential flooding and issue early warnings. FRESTI is equipped with a siren that responds to the receipt of data transmitted using radio frequencies. As a warning signal, these sirens will be located near the village. With the use of IWT, data from FRESTI on the state of the river in real time via the Internet can be obtained by interested people living in the flood zone.

In [13], it is proposed to use modern smartphones with built-in cameras, positioning sensors and powerful processors as measuring instruments for measuring the water level during floods. With the use of volunteered geographic information (VGI), the hydrological network of water meters can be

highly compressed in space and time, even for watersheds that are currently not monitored. These are shallow streams and rivers that also need to be monitored to better understand what drives flood development and improve the reliability of their forecasting. Stationary low-cost solutions based on Raspberry Pi imaging systems are universal for continuous monitoring of hydrological parameters. The two complementary systems, the smartphone and the Raspberry Pi camera, use the same automatic water level detection methodology. The accuracy of water level measurement ranges from a few millimeters to several centimeters.

An expert system for forecasting floods based on web services, including a knowledge base with the ability to read data from sensors, such as precipitation, river flow, in real time, is considered in [14]. Its use will facilitate the monitoring of various influential factors that contribute to an increase in the level of flood waters in flood areas and, as a result, will allow decision-makers to take measures to prevent the occurrence of emergencies.

Based on the review of modern trends in the development of systems for automated control and monitoring of the state of water bodies, the following conclusions can be drawn:

- a number of existing systems for monitoring and forecasting the level of flood waters that are operated in Ukraine, such as TISA, Prykarpattya, AKSON, etc., physical properties of soils;
- domestic developments that use self-contained power sources do not allow continuous monitoring of the state of water bodies, which is especially important during floods;
- modern foreign systems under development or testing are based on the use of microcontrollers Arduino Uno, ESP, etc. to collect data from sensors, which are increasingly used as "smart" converters of physical quantities. At the same time, microcontrollers are integrated with IoT technologies for data transmission via 3G and 4G cellular networks, allowing interested persons living in the area of possible flooding to track changes in the water level in the river via the Internet;

- to predict the water level based on the processing of the received data from the sensors, a hybrid system of the ANFIS model and the LMR model is used, which makes it possible to increase the accuracy of forecasting the development of floods;

- the use of a smartphone and a Raspberry Pi camera, which use the same methodology for automatically determining the water level, will expand the water level control zone in streams and small rivers, and take into account their influence on the formation of the general level of flood waters.

Considering the above, a basic version of the geoinformation system for monitoring the state of water bodies "GIS-Dniester" was proposed on the basis of hardware and software from Siemens and "smart" converters - an ultrasonic level sensor XPS10 [15] together with "smart" converters Multiranger 100 [16].

### **Purpose and composition of "GIS-Dniester"**

The developed system is designed for remote monitoring of the main meteorological parameters of the Dniester River waters and the environment at controlled points and transfer of measurement and visual data for their subsequent processing, visualization, documentation and long-term storage.

The system allows organizing local and central dispatching points and operates in real time.

The automated system includes the following components:

- server workstation based on IBM-PC;
- industrial and RZ-routers of the GSM standard for wireless industrial communication;
- programmable logic controller (PLC) SIMATIC S7-1200 "Siemens";
- signal modules SM for processing and digitizing output signals from sensors;
- communication equipment (power supplies, switches, connectors, cables, etc.);
- sensors of basic meteorological parameters;
- top-level software – SCADA-system (supervisory control and data collection system).

The system is designed as a single hardware and software complex with a distributed archi-

itecture and is optimized for working with remote monitoring objects and local and central dispatch centers. GIS-Dniester is capable of performing any tasks related to collection, primary processing, transfer and storage of controlled parameters.

The hardware part of the system is based on the products of world manufacturers in the field of industrial automation and communications. The main control functions are implemented on the hardware and software of the Siemens concern.

The system is compatible with sensors with unified measurement signals from a wide range of manufacturers.

The communication network is implemented on the basis of VPN (Virtual Private Network) of the mobile operator "Kyivstar" of the GSM standard, provides access to technological equipment practically throughout the entire territory of Ukraine and protection from unauthorized access.

Application software has been developed for the controller and workstation, which adapts to the hardware configuration of a specific object. The dispatcher's dialogue with the system is implemented in the form of mnemonic diagrams (interface pages) in the SCADA system (Supervisory Control And Data Acquisition). Provided the functions of visualization, archiving, warning signaling of controlled parameters going beyond the permissible limits and documentation of monitoring parameters.

In the extended version of GIS-Dniester, it is possible to control additional parameters (water turbidity, flow rate, etc.).

Structurally, the main devices of the system are made according to a modular principle and are placed in a mounting container (Fig. 1), which does not include sensors and the dispatcher's workstation. The system is designed for continuous operation.

In the process of integrating "smart" converters into GIS-Dniester, it is necessary to solve the problems of organizing hardware and software for parameterizing and diagnosing "smart" converters, establishing a communication environment for industrial communication, developing algorithms for collecting, processing and transmitting data, studying the

characteristics of measuring signals, also research of information processes in such systems [17, 18]. The study of the echo profiles of ultrasonic signals from the XPS10 transducer was carried out on the basis of the DELPHIN PLUS V1.5 instrumentations [19].

Fig. 2 shows the results of the parameterization of the ultrasonic "smart" level transducers Multiranger 100 with the XPS10 sensor.

In Fig. 3 – 5 the results of the investigation of the echo profiles of the XPS10 ultrasonic level sensor with the Multiranger 100 "smart" transducer are unknown. The XPS10 sensor is installed in a special container and mounted on the bridge over the Dniester river in Galich over the middle of the river bed. The distance from the sensor to the water surface was 10 m.

At the output of the "smart"-converter Multiranger 100, a unified current signal (4...20 mA) is generated, fed to the PLC S7-1200 [20], where it is digitized, normalized and scaled for further use as part of GIS-Dniester.

Analysis of the echo profiles of the XPS10 ultrasonic level sensor showed that the reliability of the correct reception of the signal reflected from the water surface depends on many factors (water and air temperature, humidity, the presence of various kinds of electromagnetic interference and building structures).

The system implements the ability to re-

motely read the echo profiles of the XPS10 ultrasonic level sensor, which made it possible to analyze a large number of echo profiles under various environmental conditions, and therefore select the optimal parameters and operating modes for the XPS10 ultrasonic level sensor and the Multiranger 100 "smart" transducer.

As a result of the research, the functionality of the GIS-Dniester was expanded, including by blocking individual components of the echo profiles that arise due to structural obstacles when measuring the water level, which made it possible to increase the accuracy of the results.

The hardware configuration of the S7-1200 PLC was carried out in the TIA Portal V14 software environment in the "run-time" mode (see Fig. 5), which includes:

- Project tree – project tree "Galich\_1\_PLC\_Sensor\_060421\_1";
- hardware PLC S7-1200 (PLC\_1, AI 4x13BIT\_1, AI 4x13BIT\_1)
- hardware catalog - hardware catalog.

In Fig. 6 shows a fragment of the application in the FBD (Functional Block Diagram) language, which implements the algorithm for processing the initial measuring signal from the MultiRanger 100 level transducer in the TIA Portal V14 software environment in the "run-time" mode. The program includes the following program instructions for processing



Fig. 1. Exterior view of the mounting container GIS-Dniester

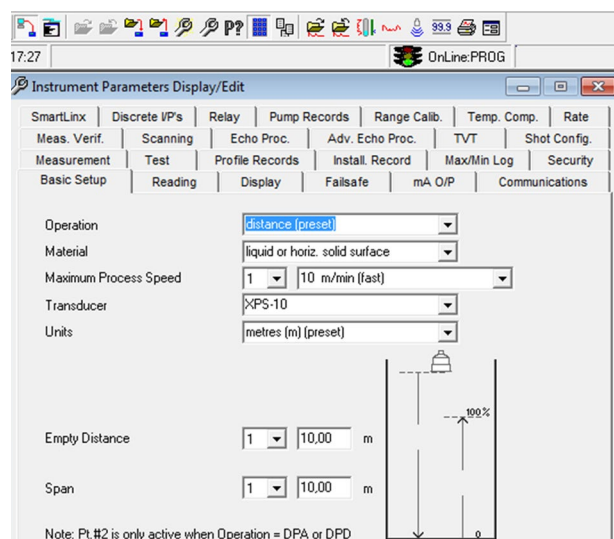
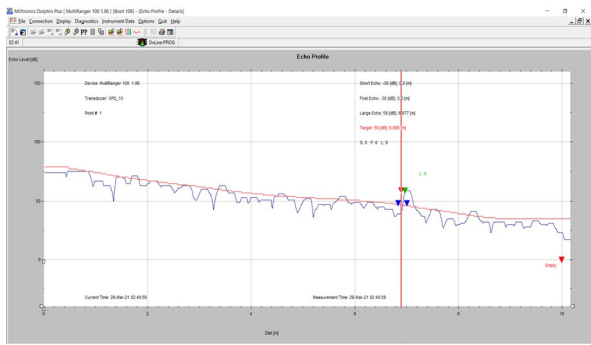
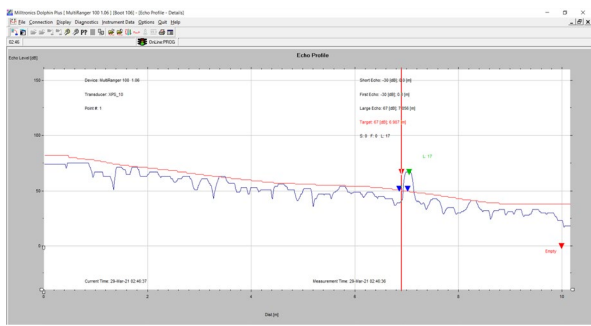


Fig. 2. Parameterization results of the ultrasonic "smart" level transducers Multiranger 100 with XPS10 sensor

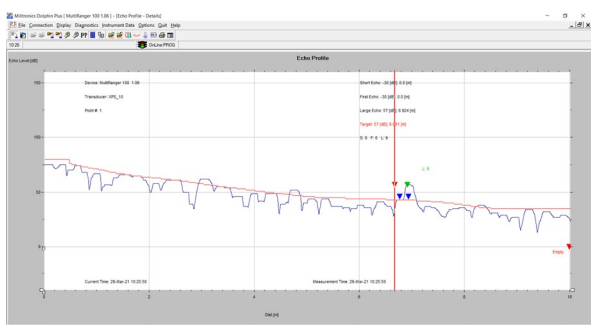




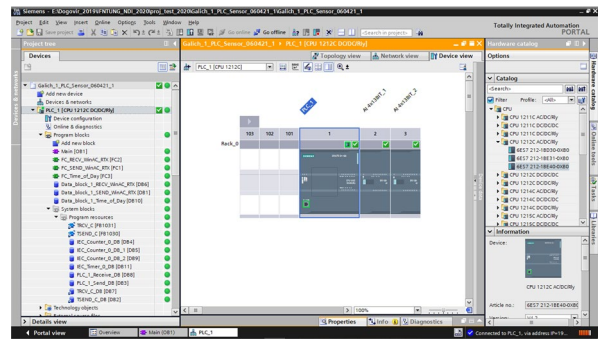
**Fig. 3.** Echo profile of the XPS10 ultrasonic level sensor (correctly defined echo profile of the reflected signal with a L level of 9 dB)



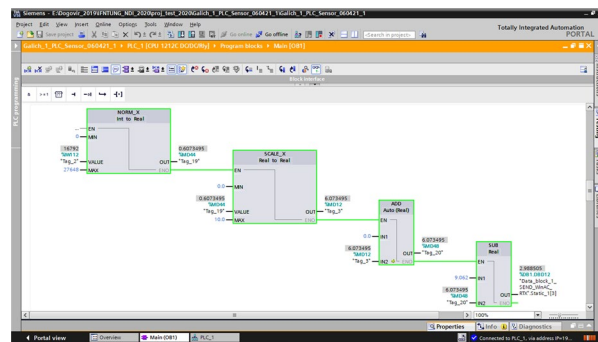
**Fig. 4.** Echo profile of the XPS10 ultrasonic level sensor (correctly defined echo profile of the reflected signal with level L: 17 dB)



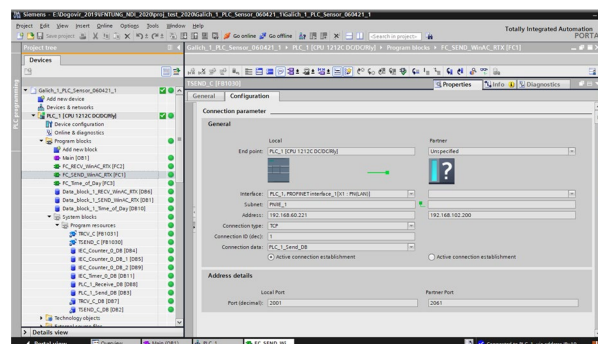
**Fig. 5.** Echo profile of the XPS10 ultrasonic level sensor (the echo profile of the reflected signal with a L level of 9 dB is incorrectly determined)



**Fig. 6.** Hardware configuration of the S7-1200 PLC in the TIA Portal V14 software environment in the "run-time" mode



**Fig. 7.** Fragment of an application in the FBD language that implements the signal processing algorithm from the MultiRanger 100 level transducer in the "run-time" mode



**Fig. 8.** Procedure for parameterizing the communication connection between the local monitoring station and the server

and calculating the absolute value of the water level in the Dniester River:

- NORM\_X – normalizing function, converts the digitized value of the measured distance signal from the level sensor in the plane of the monitored object within (0-27648 relative units) into a floating point value within (0.0...1.0);

- SCALE\_X – scaling function, converts the normalized value of the measured signal into the absolute value of the monitored parameter (distance from the level sensor of the plane of the monitored object), taking into account the measuring range of the XPS10 level sensor and the MultiRanger 100 transmitter within (0...10 m);

- ADD – function of linear correction of the absolute value of the controlled parameter;

- SUB – subtraction function, which converts the measured distance to the controlled object into a level (the level of the Dniester river in Galich\_1).

Fig. 7 shows the procedure for parameterizing the communication connection between the local monitoring station and the server.

In Fig. 8 shows a fragment of an application in the FBD language that implements the process of transferring data from a local monitoring station to a dispatch server.

A dispatcher's workstation is installed in the central control room, which provides monitoring of remote objects.

After activation of the corresponding object of control (for example, Galich\_1), the window of the main page of GIS-Dniester is displayed on the screen (Fig. 9).

The main part of the main interface page contains the following components:

- a field of archives in the form of trends in the main meteorological parameters of the Dniester River waters and the environment with scales of the corresponding color and time scale;
- buttons for switching to other pages of the interface;
- current monitoring parameters;
- archive monitoring parameters;
- scales of current parameters;
- tools for managing the field of archives;
- system time;

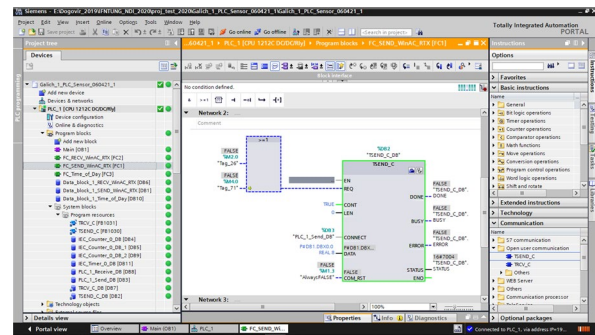


Fig. 9. Fragment of an application program that implements the process of transferring data from a local monitoring station to a dispatch server

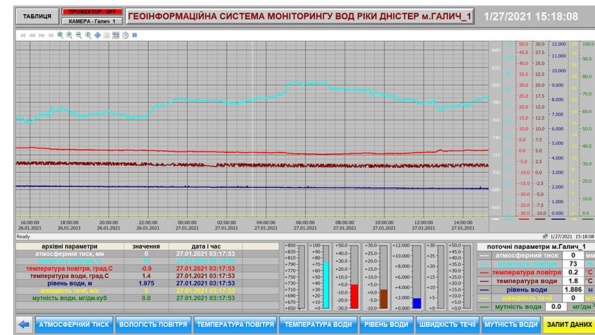


Fig. 10. Monitoring system main page window

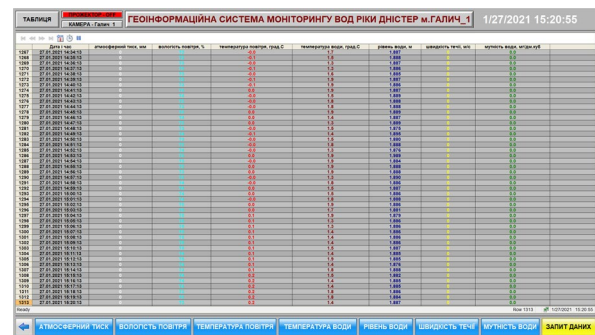


Fig. 11. Tabular archive of the main meteorological GIS-Dniester

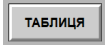

- marker of archive parameters (movable vertical white line).
- Other pages of the monitoring system interface contain information in accordance with the monitored parameter:
- air humidity (blue trend - from 0 to 100%);
  - air temperature (red trend – from -30 to +50° C);

- water temperature (dark red trend – from -10 to +30° C);
- water level (blue trend – from 0 to 12 m).



Further, the dispatcher can use the movement tools to view and scale to refine the archived parameters at appropriate time intervals.



To go to the tabular archive, use the "table" button . The tabular archive window (Fig. 10) is intended for archiving tabular values with a selected time interval. The window interface allows viewing the archives of meteorological parameters. The first column displays the record number, the second – the date and time of the recording, all the rest – the corresponding archive parameters. To view the previous values of tabular archives, you must activate the "pause" button  and use the "scroll" tool to go to the required date and time.

In addition, the developed GIS-Dniester is equipped with a HIKVISION DS-2CD2010F-I video camera, which is installed on the support of an old bridge in the city of Galich, allows for visual control of the level of the Dniester River through a video surveillance subsystem (Fig.11, 12).

## CONCLUSIONS

Automated systems for monitoring and control of water bodies that are in working condition, at the stages of development or implementation, do not provide hydrometeorological monitoring of the state of water bodies in Ukraine due to their small number, high cost and technical characteristics that do not correspond to the modern level. Inadequate funding from the state does not allow the creation of a sufficient number of modern monitoring systems, reduces the effectiveness of the forecasting organizations of the hydrometeorological service to prevent emergencies caused by the development of floods.

Modern trends in the development of systems for automated control and monitoring of the state of water bodies are aimed at the use of "smart" -converters of physical quantities, microcontrollers such as Arduino Uno, ESP, etc., which are integrated with IoT technologies for data transmission through wireless sensor networks based on LoRa technology and cellular 3G and 4G networks; modern smartphones with built-in cameras, positioning sensors and powerful processors, with a Raspberry Pi camera allow automatic water level detection. The use of IWT technologies

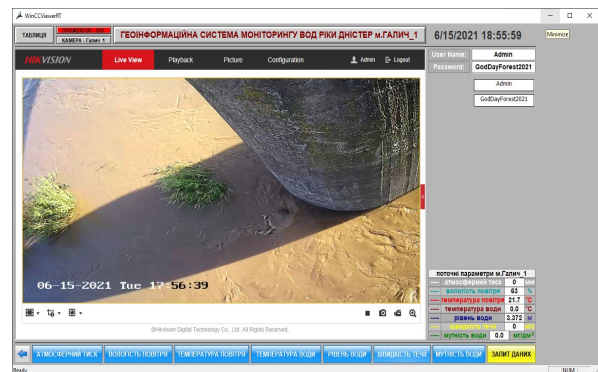


Fig. 12. Visual control over the level of the Dniester river through a video surveillance subsystem dated 06.15.2021

will allow interested persons living in the zone of possible flooding to monitor changes in the level of water bodies via the Internet and make appropriate decisions.

The proposed structure of GIS-Dniester based on industrial ICT with the use of modern hardware and software and "smart"-converters and a video camera, which made it possible to provide visual control over the level of the Dniester River. The purpose of GIS-Dniester, the main components and the principle of its operation are considered. Due to modularity and unification, the basic GIS – Dniester can be expanded or modernized and supplemented with other types of sensors.

The results of the study of the echo profiles of the XPS10 ultrasonic level sensor with Multiranger 100 "smart" converters, which made it possible to increase the accuracy of water level measurement, were considered, the hardware configuration of the S7-1200 PLC in the TIA Portal V14 software environment was carried

out in the "run-time" mode and the fragment applications in the FBD (Functional Block Diagram) language, which implements the algorithm for processing the original measuring signal from the MultiRanger 100 level transducer. The use of the developed GIS-Dnister has shown its efficiency and reliability in operation.

### REFERENCES

1. **Zamikhovskiy L.M., Klapoushchak O.I., 2011.** Analysis of methods and systems for monitoring and forecasting the level of flood waters. *Oil and Gas Energy: All-Ukrainian Scientific and Technical Journal*, Vol.2 (15), 99-105. ISSN 1993-9868 (in Russian).
2. **Yevhen Gorbatenko, Irina Bratasyuk, Vladimir Sharov, 2015.** Mobile building is in coastal hydraulic engineering. *Underwater Technologies*, Vol.01, 23-33 (in Russian).
3. **Yevhen Klushnychenko, Iryna Savchuk, 2020.** The use of geographical and informational systems the provision state and public interests in the implementation of urban development. *Underwater Technologies*, Vol.10, 66-74.
4. **Zamikhovskiy L.M., Oliynyk A.P., Klapoushchak O.I., Shtaiyer L. O., 2014.** The flood process mathematical modelling an their prediction methods based on static data. *Life Science Journal* No. 8s, 473-477. ISSN 1097-8135 (Print) / ISSN: 2372-613X.
5. **Klapoushchak O.I., 2012.** Analysis of existing automated information and measuring systems for flood control. *Scientific news of the Galician Academy*, Vol. 2 (22), 36-44. ISSN 2225-9716 (in Ukrainian).
6. **Serebryanskyi D.V., Kravchynskyi R.L., 2012.** Automation of the system for collecting and analyzing data on the state of water bodies in Ukraine: Current state and prospects. *Hydrology, hydrochemistry, and hydroecology*, Vol.1 (26), 28-33 (in Ukrainian).
7. **Nastyuk M. H., Ivanova.N.O., Nthadailova T.M., Samoilenko N.A., 2013.** Experience of using modern technology of hydrometric measurements in the hydrometeorological service of Ukraine. *Naukovi Praci UkrNDUMI*, Vol.264, 43-51 (in Ukrainian).
8. **Design of River Monitoring Device with the Internet of Things Using LPWAN Based(Conference Paper), 2020.** Jumhana, S.R., Azmi, F., Setianingsih, C. 2nd International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering, ICECIE 2020; Kuala Lumpur; Malaysia; 28 November; Category numberCFP20U62-ART; Code 166393.
9. **Imran, M., Sheikh Abdul Khader, P., 2020.** Forecasting water level of Jhelum River of Kashmir Valley India, using prediction and earlywarning system. *Geography, Environment, Sustainability*. Vol.13, Iss.2, 35-42. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-169.
10. **Ali, S.A., Ashfaq, F., Nisar, E., Azmat, U., Zeb, J., 2020.** A Prototype for Flood Warning and Management System using Mobile Networks. *Proceedings of 2020 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST 2020*. January, Article number 9044531, 326-331. DOI: 10.1109/IBCAST47879.2020.9044531.
11. **Moreno, C., Aquino, R., Ibarreche, J., Pérez, I., Castellanos, E., Álvarez, E., Rentería, R., Anguiano, L., Edwards, A., Lepper, P., Edwards, R.M., Clark, B., 2019.** Rivercore: IoT device for river water level monitoring over cellular communications. *Sensors (Switzerland)*. Vol.19, Iss. 1, 1 January, Article number 127. DOI: 10.3390/s19010127.
12. **Restu Purnomo, Mahmud Hari Pamungkas, Daffa Arrofi and Abdul Goni., 2018.** Flood prediction using integrated sensor based on internet of thing and radio frequency as flood risk reduction. *AIP Conference Proceedings* 1987, 020070; <https://doi.org/10.1063/1.5047355>.
13. **Versatile mobile and stationary low-cost approaches for hydrological measurements, 2018.** *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Archives*, 42 (2), 543-550.
14. **Ul Islam, R., Andersson, K., Hossain, M.S., 2015.** A web based belief rule based expert system to predict flood. *17th International Conference on Information Integration and Web-Based Applications and Services, WAS 2015*, Brussels, Belgium, 11 December. DOI: 10.1145/2837185.2837212.
15. **Ultrasonic Transducers XPS10/15F., 2013.** Operating Instructions: Siemens (A5E32725813) 08, 28.
16. **Ultrasonic controllers MultiRanger 100/200., 2019.** Operating Instructions: Siemens (7ML19985FB06, rev 6.2), 282.
17. **Zamikhovskiy L. M., Nykolaychyk M.Ya., 2018.** Hardware and software complex for parameterization and commissioning of Smart-converters for automated process control systems. An intellectual product of scientists, inventors and innovators of the Carpathian

region. An annual catalog of the most significant inventions, utility models, industrial designs and rationalization proposals, 30-33 (in Ukrainian).

18. **Nykolaychuk M.Ya., 2018.** Hardware and software complex for remote parameterization of smart-converters as part of the APCS. Collection of abstracts of the XIV international conference Control and management in complex systems. Vinnitsa, 15-17.10.2018 (in Ukrainian).
19. **Dolphin Plus. (2002).** Instrument configuration software. Siemens Milltronics, 9.
20. **S7-1200 Programmable controller, 2019.** System Manual: Siemens (A5E02486680-AN, V4.4), 1542.

### Тенденции развития систем мониторинга состояния водных объектов и разработка ГИС-Днестр на базе промышленного ИВТ

*Леонид Замиховский, Елена Замиховская,  
Николай Николайчук, Иван Левицкий*

**Аннотация.** В работе показано, что недостаточное и несвоевременное гидрологическое прогнозирование уровня развития наводнений приводит к ежегодным значительным экономический ущерб и человеческие жертвы. Последнее требует постоянного контроля и мониторинга состояния водных объектов, что возможно при наличии современных автоматизированных систем контроля и мониторинга. Проведенный анализ показал, что информационно-измерительные системы (АИИС) контроля паводковых вод, эксплуатируемых в Украине, их количество, стоимость и технические характеристики не обеспечивают получения необходимой для прогнозирования развития наводнений информации.

Анализ тенденций развития систем автоматизированного контроля и мониторинга состояния водных объектов показал, что современные зарубежные системы, которые находятся на стадии разработки или апробации основанные на использовании микроконтроллеров, «smart»-преобразователи физических величин, современных систем связи и технологии Интернет вещей, а также использовании смартфонов с камерой Raspberry Pi для определения уровня воды в реках.

Приводится разработка с использованием промышленного Интернет вещей базового варианта геоинформационной системы контроля и мониторинга состояния водных объектов ГИС-Днестр. Рассматриваются структура, компоненты и функции ГИС-Днестр. Решаются задачи по организации аппаратно программных средств для параметрирования и диагностики «smart»-преобразователи, налаживание коммуникационной среды промышленной связи, разработки алгоритмов сбора, обработки и передачи данных, исследования характеристик измерительных сигналов. приводятся результаты исследования эхо-профилей ультразвукового сенсора уровня XPS10 со «smart» – преобразователи Multiranger 100, а также процедура работы с ГИС-Днестр. Использование разработанной ГИС-Днестр показало ее эффективность и надежность в работе.

## Investigation of mechanical properties and crack resistance parameters of steel reinforcements of reinforced concrete structures of long-term special term

*Petro Kulikov<sup>1</sup>, Yulia Makarenko<sup>2</sup>, Victor Khoruzhiy<sup>1,3</sup>, Valeriy Makarenko<sup>1,4</sup>*

<sup>1</sup> Kyiv National University of Construction and Architecture  
Povitroflotskiy avenue 31, Kyiv, Ukraine, 03037  
[gti05@ukr.net](mailto:gti05@ukr.net)

<sup>2</sup> University of Manitoba, 750 Bannatyne Avenue, Winnipeg, Canada  
[green555tree@gmail.com](mailto:green555tree@gmail.com), [orcid.org/0000-0003-1252-4231](https://orcid.org/0000-0003-1252-4231)  
<sup>1,3</sup> [xorujji@ukr.net](mailto:xorujji@ukr.net), [orcid.org/0000-0002-5314-0483](https://orcid.org/0000-0002-5314-0483)  
<sup>1,4</sup> [orcid.org/0000-0001-6668-3957](https://orcid.org/0000-0001-6668-3957)

Received 11.09.2021, accepted after revision 25.09.2021  
<https://doi.org/10.32347/uwt2021.11.1801>

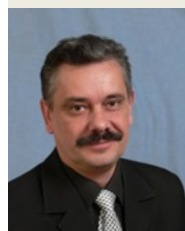
**Abstract.** It is known that the fatigue process begins with the plastic deformation of the surface layers of the metal fittings. Moreover, the displacement of dislocations under conditions of re-alternating loads is observed at loads below the elastic limit of the metal. The rate of local plastic deformation during cyclic deformation is several orders of magnitude higher than the rate of deformation under static loading. Dislocation slip begins in grains with a favorable orientation near stress concentrators. As the number of cycles in the surface layers increases, the density of dislocations and the number of vacancies increases. When the base number of  $N_R$  cycles is reached, a surface reinforced layer of metal with a large number of germinal cracks is formed, the size of which does not reach a critical value. Increasing the number of cycles cannot cause further development of fracture in such a layer. Only when the stresses exceed the endurance limit of the crack reach a critical length, after which the process of their discharge into the main crack begins with the spread of the latter. The results of experimental studies indicate a strong effect of diffusion hydrogen on static and cyclic parameters of crack resistance. It was found that with increasing flooding, especially when the hydrogen content exceeds  $5 \text{ cm}^3/100\text{g}$ , both static strength and long-term strength (fatigue) decrease sharply. Moreover, for these areas of hydrogen solution in reinforcing steel is characterized by a viscous nature of fracture, while for heavily flooded reinforcement (from 5 to  $12 \text{ cm}^3/100\text{g}$  is charac-



**Petro Kulikov**  
Rector  
Dr.Econ.Sc., Prof.



**Yulia Makarenko**  
Department of Biochemistry  
Bachelor



**Victor Khoruzhiy**  
Head of the Department of Water  
Supply and Sewerage  
Dr.Tech.Sc., Prof.



**Valeriy Makarenko**  
Professor of the Department  
of Water Supply and Sewerage  
Dr.Tech.Sc., Prof.

terized by brittle fracture by the mechanism of microfission in the hardened (martensite or troost-

ite structure). allowed to determine the optimal hydrogen content in reinforcing steel ( $3...5 \text{ cm}^3 / 100\text{g}$ ), the excess of which will reduce the crack resistance of reinforcement during long-term operation, especially in corrosive environments. The results of the research confirm the above data. bainite structure y sharply reduces the crack resistance of reinforcing steel, which makes it impossible to use in the manufacture of reinforcement involved in reinforced concrete structures designed for long-term operation (more than 50...60 years). Thus, the obtained diagram can be recommended to designers of reinforced concrete structures for hydraulic purposes, as it greatly facilitates the reasonable choice of reinforcement in the development of reinforced concrete structures for responsible and long-term use.

**Keywords:** crack resistance, flooding, fatigue, cyclicity, fittings.

## INTRODUCTION

It is known [1 – 5] that the resistance of the metal to fatigue failure is characterized by the limit of endurance (fatigue), ie it is the highest stress that can withstand the metal without failure at any number of cycles. The endurance limit is most often determined in tests with alternating symmetric cycle ( $R=-1$ ), and therefore the endurance limit is denoted by  $\sigma_{-1}$ .

As a rule, the endurance limit is limited to  $10^7$  cycles (this number of cycles is called the test base). Thus, it can be noted that the endurance limit is the maximum cycle stress that can withstand the material without destruction at the base number of cycles (for ferrous metals, this base is  $10^7$  cycles). Then on fatigue curves it is possible to find such important indicator, as durability at fatigue under which accept number of cycles of loading which maintains steel at destruction at a certain pressure.

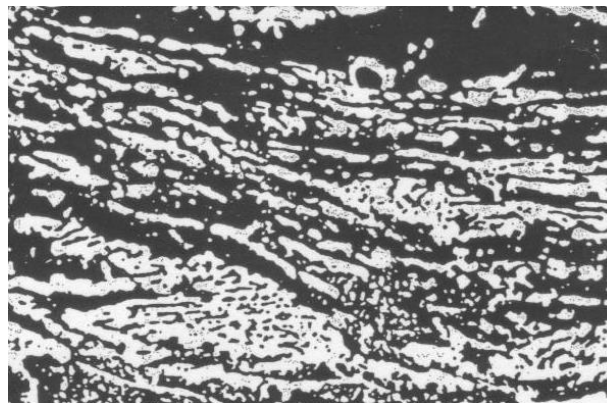
It is known from the literature [1] that the endurance limit in metal correlates well with the mechanical properties of metals. Thus, the value of  $\sigma_{-1}$  is on average  $(0.4...0.6) \sigma_B$  – for carbon and alloy steels;  $(0.3...0.5) \sigma_B$  – for bronze and brass. This characteristic can be similarly compared with Brinell hardness:

- $\sigma_{-1} = (0.128...0.156) \text{ HB}$  – for carbon steels;
- $\sigma_{-1} = (0.168...0.222) \text{ HB}$  - for alloy steels;
- $\sigma_{-1} = 0.19\text{HB}$  – for aluminum alloys.

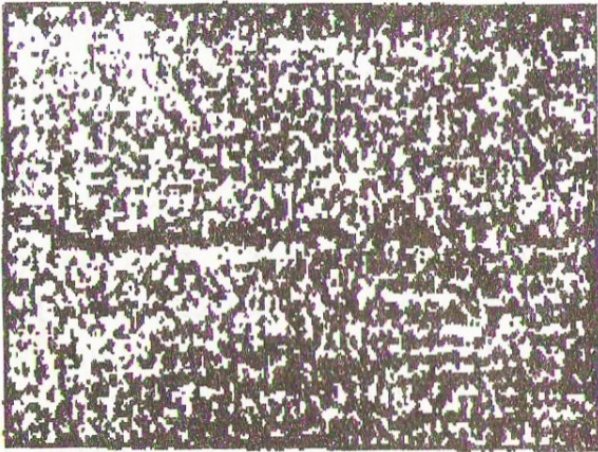
It is known from modern fracture mechanics [2...4] that with increasing number of cycles at any stresses above the endurance limit in metal, the following processes occur sequentially:

- 1) plastic deformation;
- 2) the formation of cracks, the cells of which are non-metallic inclusions (HB);
- 3) gradual development of some of them with the predominant spread of the main crack;
- 4) rapid final destruction.

The process of fatigue begins with the plastic deformation of the surface layers of the metal fittings. Moreover, the displacement of dislocations under conditions of re-alternating loads is observed at loads below the elastic limit of the metal. The rate of local plastic deformation during cyclic deformation is several orders of magnitude higher than the rate of deformation under static loading. Dislocation slip begins in grains with a favorable orientation near stress concentrators. As the number of cycles in the surface layers increases, the density of dislocations and the number of vacancies increases. When the basic number of  $N_R$  cycles is reached, a surface reinforced layer of metal with a large number of germinal cracks is formed, the size of which does not reach a critical value (Fig. 1). Increasing the number of cycles cannot cause further development of fracture in such a layer. Only when the stresses exceed the endurance limit of the crack reach a critical length (Fig. 2), after which the process of their discharge into the main crack begins with the spread of the latter.



**Fig. 1.** Embryonic microcracks in the surface layers of reinforcing rods ( $\times 4800$ )



**Fig. 2.** The main crack in the surface layers of steel reinforcement of reinforced concrete structures of long operation in an aggressive environment ( $\times 200$ )

#### FORMULATION OF PROBLEMS AND RELEVANCE OF THE TOPIC

The ultimate stresses at which the process begins, for example, hydrogen sulfide fracture (HSF), are recommended as criteria for comparing the stability of different reinforcing steels [5, 6]. One of the important factors influencing the resistance to HSF is the composition and structure of steel. Yes, carbon has a significant effect on HSF. It is known [6, 7] that with increasing amount of carbon the tendency of hardened steels to HSF increases due to increasing internal stresses. Hydrogen diffusing into the metal, even in small quantities ( $2 \dots 3 \text{ cm}^3/100\text{g}$ ) does not cause sufficient for the development of cracks of local plastic deformations in strong metal. It is believed that steel loses its viscoelastic characteristics at a hydrogen content in the range of  $7 \dots 12 \text{ cm}^3/100\text{g}$  [8]. However, as established in [9], hydrogen fragility can occur with a small amount of absorption (absorbed) hydrogen. Thus, in steel with a tensile strength of 1600 MPa, doped with 0.7% Cu, 0.25% Mo, 0.8% Nb and 0.025% Al, a decrease in plastic properties ( $\delta$ ) was observed from 45 to 3% at the level of flooding  $0.03 \text{ cm}^3/100\text{g}$ .

It should be noted that the analysis of literature sources of domestic and foreign research-

ers does not provide an unambiguous answer to the question of the influence of hydrogen and alternating stresses on the embrittlement of reinforcing steel of different brands, and the results of experimental studies are usually obtained in different conditions different external factors, and therefore characterized by contradictions, making them difficult to compare and draw final conclusions, although the problem of degradation of reinforced concrete structures is relevant and, moreover, is important for the construction industry of Ukraine, resulting in additional experimental and theoretical studies.

**The purpose of the work** – research of mechanical properties and parameters of crack resistance of steel samples of various brands intended for production of armature of reinforced concrete designs of long service life in aggressive environments.

#### METHODS OF EXPERIMENTAL RESEARCH, MATERIALS, CRITERIA AND EQUIPMENT

The object of research was reinforcing steel of the following grades: 16Г2АФ; 20Ф; 09Г2ФБ; 15ХСНДА; 10ХСНДА and 06Г2Б, that is steel carbon, low-alloy, which had a structure of ferritic-perlite, sorbitol and troostite and martensitic with a coefficient of endurance  $K_V=0.40 \dots 0.50$ .

After fabrication, the reinforcement samples were subjected to different heat treatment modes depending on the steel grade and obtaining the desired type of structure. The samples were polished with a grinding skin with a grain size of 3/0, and then subjected to tempering in a vacuum chamber at  $620^\circ\text{C}$  for 30 min to remove residual stresses. The samples were tested on the setpoint of the model "Instron" (UK). The tests were performed in air. The impact of the aggressive environment was absent. We add that the tests were performed according to the requirements of the Specification of the International Association of Corrosives (Specification Tenquiz Oil and Gas Plant //Prozess Plant. Lurgi code: 65102-00-MAL-TENGUIZ II. Specification SP.SPC-62900-XP-007). Fractographic and metallographic



studies were performed using an electron scanning microscope model "YSM-35CF" (firm "Jeol", Japan). Mechanical tests and the type of samples of cut rebar rods met the requirements set out in the literature [1, 5].

RESEARCH RESULTS AND THEIR DISCUSSION

In experimental studies, the following steels were used as an object 15XCHДА, 10 XCHДА, 16Г2АФ, 06Г2Б, 08XMЧА, 16Г2АФ, 17Г2СФ, 09Г2ФБ, 09Г2С, 20А.

It is established that steel has the following chemical composition and mechanical characteristics:

– steel 20А:  $S_{max} = 0.012\%$ ;  $P_{max} = 0.015\%$ ;  $\sigma_v = 502...527 \text{ N/mm}^2$ ;  $\sigma_T = 372...509 \text{ N/mm}^2$ ;  $\sigma_T/\sigma_v \leq 0.8$ ;  $\delta \geq 25\%$ ;  $HRB < 92$ ;  $KCV, Jcm^2 =$

$79.4...166.5 (+20^\circ\text{C})$ ;  $= 39.2...88.2 (-40^\circ\text{C})$ ; score of grain according to GOST 5639-82:  $\geq 8$ ; score according to HB (GOST 1778-80):  $\leq 2.5$ ; stripe PF according to GOST 5640-88:  $\leq 2$ ;

– steel 08XMЧА:  $S_{max} = 0.015\%$ ;  $P_{max} = 0.015\%$ ;  $\sigma_v = 502...509 \text{ N/mm}^2$   $\sigma_T = 378...470 \text{ N/mm}^2$ ;  $\sigma_T/\sigma_v \leq 0.8$ ;  $\delta \geq 25\%$ ;  $HRB < 95$ ;  $KCV, Jcm^2 = 107.8...177.5 (+20^\circ\text{C})$ ;  $= 49.3...79.2 (-40^\circ\text{C})$ ; score of grain according to 5639-82:  $\geq 9$ ; score according to HB (GOST 1778-80):  $\leq 2.5$ ; stripe PF according to GOST 5640-88:  $\leq 2$ ;

– steel 20Ф:  $S_{max} = 0.008\%$ ;  $P_{max} = 0.012\%$ ;  $\sigma_v = 470 \text{ N/mm}^2$   $\sigma_T = 338...402 \text{ N/mm}^2$ ;  $\sigma_T/\sigma_v \leq 0.8$ ;  $\delta \geq 25\%$ ;  $KCV, Jcm^2 = 90...98.2 (-40^\circ\text{C})$ ; score of grain according to GOST 5639-82:  $\geq 9$ ; score according to HB (GOST 1778-80):  $\leq 2.5$ ; stripe PF according to GOST 5640-88:  $\leq 2$ ;

Table 1. Chemical composition of steels 10XCHДА and 15XCHДА

Steel brand	Mass fraction of elements%						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb
10XCHДА	$\leq 0.12$	0.8...1.2	0.08...0.98	0.32...0.62	0.22...0.63	0.38...0.58	0.28...0.58
15XCHДА	0.1...0.15	0.4...0.75	0.62...0.89	0.32...0.58	0.22...0.51	0.21...0.39	0.03...0.58

Note the mass fraction of S and P  $< 0.010-0.015\%$ ; nitrogen to 0.012%. An admixture of niobium and vanadium in the amount of 0.08-0.12% is allowed.

Table 2. Mechanical properties of rolled steel 10 XCHДА and 15 XCHДА

Steel Brand	$\sigma_T$	$\sigma_v$	Relative lengthening, %	Impact strength, RCU, J/cm <sup>2</sup>	
	N/mm <sup>2</sup>			+20°C	-40°C
10XCHДА	422...500	560...650	$\geq 21...24$	70	54
15XCHДА	390...495	520...630	$\geq 22...25$	68	56

Table 3. Physical characteristics of the  $\alpha$ -phase

Designation	Physical characteristics of the $\alpha$ -Fe phase		
	Crystal lattice period, nm	Density of dislocations, $\rho \cdot 10^9, \text{ cm}^{-2}$	Lattice curvature, $\text{ cm}^{-1}$
10XCHДА	0.28683	1.57...2.17	440...535
15XCHДА	0.28723	1.7...2.23	557...638
Tabular value of $\alpha$ -Fe	0.28664	–	–

– steel 06X1:  $S_{\max} = 0.005\%$ ;  $P_{\max} = 0.010\%$ ;  $\sigma_v = 512 \text{ N/mm}^2$ ;  $\sigma_T = 386 \dots 512 \text{ N/mm}^2$ ;  $\sigma_T / \sigma_v \leq 0.8$ ;  $\delta \geq 25\%$ ;  $\text{HRB} \leq 92$ ;  $\text{KCV}, J_{\text{cm}^2} = 147$  ( $-40^\circ\text{C}$ ); score of grain according to GOST 5639-82:  $\geq 9$ ; score according to HB (GOST 1778-80):  $\leq 2.5$ ; stripe PF according to GOST 5640-88:  $\leq 2$ .

Tensile tests (GOST 1497-88) of samples of the type "gagariki" were performed on the installation of the model "Instron" (UK).

Impact strength was determined according to GOST 9454-88. Under the impact toughness should take the impact work related to the initial cross-sectional area of the sample at the hub  $K_S = A / F$ , where A – the work spent on

breaking the sample (fixed on the scale of the pendulum copra) (GOST 10707-82). The size of the impact samples was  $10 \times 10 \times 56$  mm. The radius of the bottom of the incision  $r = 1 \pm 0.07$  mm (incision Menage);  $r = 1 \pm 0.025$  mm (Charpy incision). The specimens were tested for a three-point bending on a pendulum swing with an impact energy of up to 300 J. The distance between the supports for mounting the specimens was  $40 \pm 0.5$  mm.

Hardness (GOST 9012-59) was determined on a hardness tester model ТИИ-2.

**Table 4.** Mechanical characteristics of steels

Steel brand	$\sigma_T$	$\sigma_v$	$\delta, \%$	KCV, J/cm <sup>2</sup> at temperatures $t = -40^\circ\text{C}$
	MPa			
15XCHДА	420	556	32	33
10XCHДА	395	515	29	38
16Г2АФ	446	595	28	39
06Г2Б	450	605	24	44

**Table 5.** Sulfur content in steels

Steel brand	Sulfur content, %
15XCHДА	0.03
10XCHДА	0.032
16Г2АФ	0.021
06Г2Б	0.012
08XMЧА	0.005...0.01

The experimental steel of the conventional grade 08XMЧА was used in the research, which was created on the basis of the improvement of steel 06X1 due to the economical modification of this steel by an alloying element from among rare earth metals - cerium in the amount of 0.02...0.03%. This steel is characterized by a very low content of sulfur and phosphorus, in particular, their content is limited to 0.05...0.10%. The content of other steel ingredients was as follows: Mn 0.57; Cr 0.9; Ni 0.12; Mo 0.25; Si 0.08...0.1%.

In addition, in some experimental tests used steel grade 20Ф, i.e. vanadium steel with a vanadium content of 1.2...1.55. This provided

a low sulfur content - no more than 0.95...0.18%. And carbon was about 0.2...0.23%.

The results of the research presented in Fig. 2 confirm the data of Fig. 1. Thus, it can be seen from Fig. 2 that carbon and low-alloy steels, which are characterized by ferritic-pearlite and sorbitol structure provides high resistance primarily to prolonged fatigue, and the transition to steels with martensite structure or tempered (bainite transition jet) structure of bainite sharply reduces the crack resistance of reinforcing steel, which makes it impossible to use in the manufacture of reinforcement involved in reinforced concrete structures designed for long-term operation (more than 50...60 years). Thus, the obtained diagram can be recommended to designers of reinforced concrete structures for hydraulic purposes, as it greatly facilitates the reasonable choice of reinforcement in the development of reinforced concrete structures for responsible and long-term use.

Table 7 below shows the data of hot-rolled steel grade 09Г2ФБ, from which were made

on a rolling mill reinforcing bars for experimental tests.

The chemical composition of carbon steel grade 20 is as follows: C 0.17...0.24; Mn 0.25...0.65; Si 0.17...0.37; P 0.036; S 0.04.

The normative and actual composition and mechanical properties of 16Г2АФ steel are given in Table 8 and 9.

Table 10 shows the experimental tests of experimental steels to determine the criteria

for crack resistance, taken from modern fracture mechanics – the parameters of brittle fracture resistance  $K_{IC}$  and  $\delta_c$  and the parameter of microcracking  $R_{MC}$ , which are sensitive to metal structure, which changes during long-term operation. The studies were performed on samples according to the methods described in works [1, 3] the results of factory laboratory tests are shown in Table 10.

**Table 6.** Mechanical characteristics and criteria of crack resistance of steel 09Г2ФБ

Chemical steel composition, %	$\sigma_B$	$\sigma_{0.2}$	$\delta_c$ , %	KCV, MJ/m <sup>2</sup>		$K_{IC}$ , MPa·m <sup>1/2</sup>		$\delta_c$ , mm	
	MPa			-40°C	-20°C	+20°C	-20°C	+20°C	-20°C
C 0.13; Mn 1.7...1.9; Si 0.35...0.40; V 0.09...0.1; Nb 0.05...0.07; S, P 0.01...0.02	560	435	19... 22	0.6... 0.7	0.8	98.5... 102.3	90... 95.4	0.7... 0.75	0.47... 0.52

**Table 7.** Impact strength of steel 09Г2ФБ

	Impact strength and fracture fiber			
	according to Menage		according to Sharpe	
	KCV, MJ/m <sup>2</sup>	B, %	KCV, MJ/m <sup>2</sup>	V, %
	0.84...1.35	50...70	0.52...1.1	35...75
	0.26...0.94	5...20	0.10...0.35	10...15
	0.12...0.64	0	0.12...0.50	0

**Table 8.** Chemical composition of 16Г2АФ

C	Mn	Si	V	N	S	P	Al
Actual (as delivered)							
0.13... 0.15	1.6... 1.66	0.32... 0.40	0.061... 0.095	0.011... 0.013	0.012... 0.022-	0.01... 0.014	0.004... 0.026
Requirements TU 14-3-1138-82							
0.11... 0.17	1.1... 1.70	0.20... 0.40	0.06... 0.10	0.010... 0.020	0.020	0.025	0.015... 0.050

**Table 9.** Mechanical properties of steel 16Г2АФ

$\sigma_v$ , MPa	$\sigma_{0.2}$ , MPa	$\delta$ , %	KCV <sub>0</sub> , MJ/m <sup>2</sup>	KCU <sub>40</sub> , MJ/m <sup>2</sup>	V under 0°C, %
Actual					
566...601	400...460	21...27	0.48...0.73	0.49...0.65	25...90
TU requirements					
540...640	370...470	≥19	≥0.4	≥0.5	≥60

**Table 10.** Parameters of crack resistance of experimental steels

Steel brand	$K_{IC}$ , MPa·m <sup>1/2</sup>			$\delta_C$ , mm			$R_{MS}$ , MPa		
	Test temperature, °C								
	+20	-20	-40	+20	-20	-40	+20	-20	-40
16Г2АФ	99.8	81.5	72.1	0.72	0.49	0.39	897	784	595
20Ф	88.7	78.3	66.8	0.71	0.68	0.60	798	680	501
15ХСНДА	105.6	98.0	83.5	0.82	0.72	0.67	925	823	675
10ХСНДА	88.9	80.2	70.1	0.68	0.60	0.52	780	692	578
09Г2ФБ	111.4	98.5	82.5	0.88	0.79	0.62	956	856	670
06Г2Б	90.2	85.9	75.7	0.82	0.73	0.69	950	870	658
08ХМЧА	121	88.7	79.2	0.92	0.78	0.73	1123	934	789

It should be noted that the use of vanadium modifier in steels (example steel 09Г2ФБ). As a rule, the content of vanadium in steels is limited to 0.1%, with a content of vanadium of 0.1...0.15% there is no further crushing of the grain, toughness at low temperatures decreases [6, 8...10], i.e. in the case of production of low-alloy steel vanadium should be introduced in the amount of up to 0.1%.

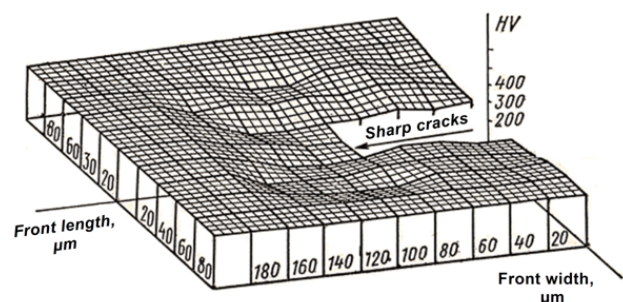
The use of niobium as a steel modifier has shown that it weakly deoxidizes steel, but at the same time is a strong carbide-forming element. In the presence of nitrogen in steel can form carbonitrides. Experiments have shown that the most favorable effect of niobium in small quantities (approximately 0.02...0.03%) and especially in combination with aluminum (about 0.02%). In this case, the strength and yield strength increase (by 40 MPa), the tendency of steel to age decreases, and so on.

In general, microalloying of low-alloy normalized steel with carbide- and nitride-forming elements slightly increases their service properties. Application of these elements in steels of the controlled rolling allows to receive higher properties on all indicators.

Microalloying of low-alloy steel (for example, 06X1) with a rare earth element - cerium - in the amount of 0.02...0.03% leads to globulation of non-metallic inclusions, the amount of oxides decreases. The positive effect of cerium on viscosity is due to its effect on the shape and amount of non-metallic inclusions, as well as to some grain crushing. The mechanism of influence of rare earth metals (REM) on the properties of steel is insufficiently studied. However, the positive effect of REM on

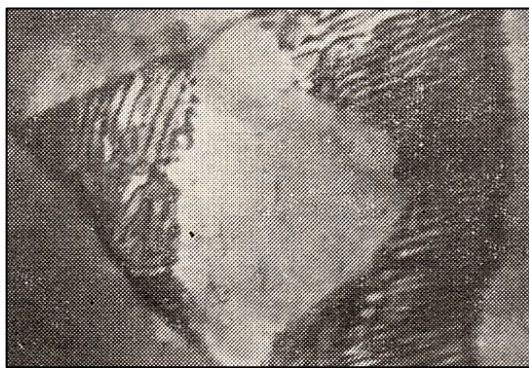
the shape of non-metallic inclusions is not in doubt. Treatment of reinforcing steels with cerium in the amount of 0.02...0.03% promotes high-quality rolled products with high corrosion-mechanical properties and which can be used in the construction of reinforced concrete structures.

We analyzed the picture of the deformed state of the steel fittings of the conventional grade 08ХМЧА (micromodified with cerium) at the crack tip. Fracture scans at the ends of the fracture were examined by fracture scanning (YSM-35CF microscope model (Jeol, Japan)). Softening of the metal (Fig. 3) to 60...70% of the original, which can be considered as the accumulation of damage caused by microplastic deformation. However, the front of this quasi-stationary zone, which moves in front of the crack apex, is small and forms a layer  $\approx 80 \mu\text{m}$  thick along the crack depth and 60...70  $\mu\text{m}$  along its walls, i.e. destruction in this case is usually quasi-brittle.



**Fig. 3.** Picture of metal softening before the crack front in reinforcing steel 08ХМЧА with corrosion cracking in the model environment NACE

It is known that simultaneously with plastic deformation, relaxation processes take place intensively. This zone is characterized by plastic deformation by internal grain slip, and therefore dislocations are concentrated mainly in the sliding strips. Next, the parent metal with the original dislocation structure is observed. The maximum density of dislocations is observed in the zone with significant residual plastic deformation, which reaches an average of 2% (total relative deformation), 10% or more in microvolumes. associated with local shifts (Fig. 4).



**Fig. 4.** Dislocation structure of deformed reinforcing steel 08XMЧА (x25000)

Next, consider the role of sulfur in the mechanical properties of the metal. It is widely known that sulfur adversely affects the properties of steel. Sulfur in the metal is usually present in the form of non-metallic inclusions, mainly manganese sulfides. It is established [2, 3] to increase the sulfur content by 0.015 in the range 0.02...0.005 shifts the critical brittleness temperature to the region of positive temperatures by 15°C. The amount of sulfur in normalized steels is reduced by metallurgists to 0.02%, and in controlled rolling steels – to 0.004% and below, which increases the toughness (according to Sharpe) almost 2 times. Low sulfur content (0.005...0.01%) significantly increases the positive effect of cerium steel treatment, which significantly increases the crack resistance of steel.

Steels with a tempering sorbitol structure have the highest survivability. This is due to the low growth rate of the fatigue crack, due to the high ductility of the metal (see Fig. 2) and the presence of a developed substructure of the

ferritic phase of sorbitol. The dislocation walls that separate the ferrite grains serve as barriers to the fatigue crack, which causes it to change direction in a zigzag pattern and spend more energy and time growing to a critical size. In addition, the steel after heat treatment for tempering sorbitol becomes insensitive to the appearance of stress concentrators and accidental shock load.

Steel heat-treated for tempering or tempering martensite has a higher  $\sigma_{-1}$ , but its significant resistance to the formation of fatigue cracks is neutralized by increased sensitivity to surface quality. In addition, high-strength steels are characterized by low resistance to cracking.

Thus, operating conditions require a special combination of high resistance to fatigue crack formation and high resistance to its propagation, which is almost impossible to provide in reinforcing steel using alloying and heat treatment. This problem is solved by the use of surface hardening technologies (surface plastic deformation, chemical-thermal treatment (CTT), surface hardening) for low- or medium-carbon steels treated with the structure of tempering sorbits. The result is steels with a strong surface and a viscous plastic core [11, 12].

## CONCLUSIONS

1. It is shown that structural inhomogeneity promotes the passage of non-uniform deformation in the volume of the metal. In turn, the higher the inhomogeneity of the deformation, the less deformation the plasticity of the metal will be exhausted, the earlier the fracture will occur, as observed in the experiments. The obtained experimental results must be taken into account in the construction of galleries of underground sewer systems by introducing into the regulatory and technological documentation of these steels in relation to the design and construction of responsible reinforced concrete structures.

2. The physical characteristics of  $\alpha$ Fe-phase in steels 10XCHДА and 15XCHДА, in particular, the number of dislocations does not exceed  $(155-220) \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , and the amplitude of

curvature of the crystal lattice does not exceed  $560...650 \text{ cm}^{-1}$ , which is characteristic of the ferritic-pearlitic phase. And the stresses are mostly elastic, not relaxed. In addition, in the field of crystals and along the boundaries of the  $\alpha$ -phase carbide phases are not established, which will increase the crack resistance of reinforcing steel during long-term operation at alternating loads.

3. It is established that steels 16Г2АФ, 09Г2ФБ and 15ХСНДА have a reserve of plasticity and ability to resist destruction at plastic deformations. In addition, these steels are characterized by high resistance to brittle fracture, and therefore they can be recommended for the manufacture of reinforcement of reinforced concrete structures designed for the perception of high alternating loads during operation in aggressive environments.

4. It is shown that the highest values of modern criteria of crack resistance are steels 16Г2АФ, 09Г2ФБ and 15ХСНДА, which are economically modified with vanadium, niobium, chromium, nickel, copper and have a very low sulfur content. This class of steels includes experimental steel of the conventional grade 08ХМЧА, which is economically modified with cerium (0.025...0.03%).

#### REFERENCES

1. **Makhutov N.A., 1981.** Deformation criteria of destruction. Moscow: Mashinostroenie, 272 (in Russian).
2. **Archakov Yu.I., 1980.** Hydrogen corrosion of steel. Moscow: Metallurgy, 192 (in Russian).
3. **Atomic mechanism of destruction, 1983,** trans., ed. MA Stremel. Moscow: Mir, 660 (in Russian).
4. **Kalachev B.A., (1985).** Hydrogen brittleness of metals. Moscow: Metallurgy, 216. (in Russian)
5. **Meshkov Yu.Ya., 1985.** Physical foundations of the strength of steel structures. Kiev: Naukova Dumka, 266 (in Russian).
6. **Petrov L.N. Sopronyuk N., 1988.** Corrosion-mechanical destruction of metals and alloys. Kiev: Naukova Dumka, 488 (in Russian).
7. **Moskvin V.M., 1980.** Corrosion of concrete and reinforced concrete methods of their protection. Moscow: Stroyizdat. 538.
8. **Makarenko V.D., Mangura A.M., Sizonenko A.V., Litvyak O.L., 2019.** Mechanisms of corrosion-carbon corrosion of structural tubular steels for oil and gas application Modernization and engineering development of resource-saving technologies in mining and processing of minerals. Collective monograph. Petrosan, Romania UNIVERSITAS Publishing, 424 (57 - 70).
9. **Makarenko V., Vynnykov Y., Liashenko A., Petrash O., 2019.** Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Reconstruction, [Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations](#). ICBI. Lecture Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Reconstruction Notes in Civil Engineering, Vol.73. Springer, Cham. 651-658.
10. **Boyko A.V., Makarenko V.D., Maximov S.Yu., 2021.** On some mechanical characteristics of structural steels of cooling systems of long operation. Problems of durability, No.2 (470), 77-81.
11. **Makarenko, V.D., & Morgun, I.D., 1991.** Special features of the effect of barium on the mechanical properties of metal deposited in welding with calcium fluoride electrodes. Welding International, 5(9), 726-728.
12. **Pokhodnya, I.K., Ponomarev, V.E., Miliuchenko, S.S., Skorina, N.V., Makarenko, V. D., Marchenko, A.E., & Gorpenyuk, V.N., (1987).** Effects of type of binder and its composition on the welding and properties of electrodes with basic coatings. Welding International, 1(2), 116-118.
13. **Petrenko E., Gharakhanlou M., (2015).** Analysis of slope at increase of the static load. Underwater Technologies, Iss.02, 40.
14. **Pushkarova K., Sukhanevych M., Bondar K., 2015.** The principles of composite construction penetrability waterproofing mortars with increased service life. Underwater Technologies Iss.02, 46.
15. **Mishchuk D., 2015.** Research of the manipulator dynamics installed on an elastic basis. Underwater Technologies, Iss.02, 54.
16. **Sukach M.K., 2017.** Elastic suspension of vehicles. Mining, construction, road and melioration machines, No.90, 73-78 <https://doi.org/10.26884/mksu.a17293> (in Ukrainian).
17. **Horbatenko Y., 2020.** The production of the splash phenomenon, as a way of dissipating the energy of a gravitational wave. Underwater Technologies, Iss.10, 58

18. Sukach M.K., 2021. The Staple-ShapePlate Springs Engineering Calculation Method. Science and Technique, 20 (3), 268-274, <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3> (in Russian).
19. Sukach M.K., Lysak S., 2017. Kinematics parameters of twosectional trencher's. Underwater Technologies, Iss.05, 16-22. <https://doi.org/10.26884/uwt1705.1301>.

### Исследование механических свойств и параметров трещиностойкости стальных укрепленй железобетонных конструкций долгосрочного специального срока

*Петр Куликов, Юлия Макаренко,  
Виктор Хоружий, Валерий Макаренко*

**Аннотация.** Известно, что процесс усталости начинается с пластической деформации поверхностных слоев металлической арматуры. Причем смещение дислокаций в условиях знакопеременных нагрузок наблюдается при нагрузках ниже предела упругости металла. Скорость локальной пластической деформации при циклической деформации на несколько порядков превышает скорость деформации при статическом нагружении. Дислокационное скольжение начинается в зернах с благоприятной ориентацией вблизи концентраторов напряжений. С увеличением количества циклов в поверхностных слоях увеличивается плотность дислокаций и количество вакансий. При достижении базового числа циклов  $N_R$  образуется поверхностно-армированный слой металла с большим количеством зародышевых трещин, размер которых не достигает критического значения. Увеличение количества циклов не может привести к дальнейшему развитию разрушения в таком слое. Только когда напряжения превы-

шают предел выносливости трещины, достигают критической длины, после чего начинается процесс их разряда в магистральную трещину с распространением последней. Результаты экспериментальных исследований указывают на сильное влияние диффузионного водорода на статические и циклические параметры трещиностойкости. Было обнаружено, что с увеличением затопления, особенно когда содержание водорода превышает  $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , как статическая прочность, так и длительная прочность (усталость) резко снижаются. Причем для этих участков раствор водорода в арматурной стали характеризуется вязким характером разрушения, тогда как для сильно обводненной арматуры (от  $5$  до  $12 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  характерно хрупкое разрушение по механизму микроделения в закаленной (мартенситной или трооститовой конструкции). позволили определить оптимальное содержание водорода в арматурной стали ( $3...5 \text{ см}^3/100\text{г}$ ), превышение которого снизит трещино-стойкость арматуры при длительной эксплуатации, особенно в агрессивных средах. Результаты исследований подтверждают приведенные выше данные, структура бейнита резко снижает трещиностойкость арматурной стали, что делает невозможным использование при изготовлении арматуры железобетонных конструкций, рассчитанных на длительную эксплуатацию (более  $50...60$  лет). Полученную схему можно рекомендовать проектировщикам железобетонных конструкций гидротехнического назначения, так как она значительно облегчает обоснованный выбор конструкции. армирование при разработке железобетонных конструкций ответственного и длительного использования.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, затопление, усталость, цикличность, арматура.

## Research of corrosion and mechanical resistance of reinforcement steels designated for operation in hydraulic structures

Mykhailo Sukach<sup>1</sup>, Myroslav Kindrachuk<sup>2</sup>, Valeriy Makarenko<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Kyiv national university of construction and architecture  
Povitroflotskiy Avenue 31, Kyiv, Ukraine, 03037  
[msukach@ua.fm](mailto:msukach@ua.fm), [orcid.org/0000-0003-0485-4073](https://orcid.org/0000-0003-0485-4073)

<sup>2</sup>Kyiv National Aviation University  
Lyubomir Guzara Avenue 1, Kyiv, 03058, [orcid.org/0000-0002-0529-2466](https://orcid.org/0000-0002-0529-2466)

<sup>3</sup>[orcid.org/0000-0001-6668-3957](https://orcid.org/0000-0001-6668-3957)

Received 04.08.2021, accepted after revision 25.09.2021

<https://doi.org/10.32347/uwt2021.11.1802>

**Abstract.** Analytical inspection showed that with a long service life of reinforced concrete structures of hydraulic structures, their individual elements such as reinforcing bars are destroyed due to insufficient fatigue and corrosion strength of the reinforcement metal. They occur mainly under the action of the main variable loads – bending, vibrations of reinforced concrete slabs, mechanical and erosion of the environment. The main causes of failure of the valve are its rupture and wear due to repeated action of force factors. The surface zone of the reinforcement in connection with concrete is especially intensively destroyed due to weak adhesion strength. The use of low-strength reinforcing steels can also be one of the reasons for the failure of reinforcement joints with concrete. Improving the corrosion and mechanical reliability of reinforced concrete structures of hydraulic structures is possible through the use of: for the manufacture of reinforcing bars which are the main power structure of reinforced concrete economically modified alloy steels, which undergo complex heat treatment and are characterized by high corrosion and fatigue properties. alternating) loads; The resistance against SCRN, VIR and corrosion-mechanical fatigue of reinforcing steels intended for the construction industry has been studied.

It was found that the experimental steels, economically modified REE, copper-nickel, especially chromium niobium and vanadium meet the requirements of the International Standard NACE MR 0175-96 on chemical composition and mechanical properties, and steels of grades



**Mykhailo Sukach**  
Professor of the Department  
of Construction Machines  
Dr.Tech.Sc., Prof.



**Myroslav Kindrachuk**  
Head of the Department of Me-  
chanical Engineering, Standardi-  
zation and Certification  
Corr.-member of NASU  
Dr.Tech.Sc., Prof.



**Valeriy Makarenko**  
Professor of the Department  
of Water Supply and Sewerage  
Dr.Tech.Sc., Prof.

10HSNDA and 20F do not have a sufficiently high resistance SCRN (<limits  $\sigma_{0.2min}$ ) and corrosion-fatigue failure, and steels of grades 20F and 06G2B showed low resistance to VIR (CLR> 6% and CTR> 3%). Therefore, it is necessary to carry out a full (100%) input control of corrosion and mechanical resistance of all materials involved in the manufacture of reinforced concrete structures



for hydraulic purposes for operation in hydrogen sulfide-containing environment.

**Keywords:** corrosion destruction, flooding, crack resistance, endurance, fatigue strength.

## INTRODUCTION

It is known [1 – 5] that the resistance of the metal to fatigue failure is characterized by the limit of endurance (fatigue), i.e. it is the highest stress that can withstand the metal without failure at any number of cycles. The endurance limit is most often determined in tests with alternating symmetric cycle ( $R = -1$ ), and therefore the endurance limit is denoted by  $\sigma_{-1}$ .

As a rule, the endurance limit is limited to  $10^7$  cycles (this number of cycles is called the test base). Thus, it can be noted that the endurance limit is the maximum cycle stress that can withstand the material without destruction at the base number of cycles (for ferrous metals, this base is  $10^7$  cycles). Then on fatigue curves it is possible to find such important indicator, as durability at fatigue under which accept number of cycles of loading which maintains steel at destruction at a certain pressure [3, 4].

It is known from the literature [1] that the endurance limit in metal correlates well with the mechanical properties of metals. Thus, the value of  $\sigma_{-1}$  is on average (0.4...0.6)  $\sigma_v$  - for carbon and alloy steels; (0.3...0.5)  $\sigma_v$  - for bronze and brass. This characteristic can be similarly compared with Brinell hardness:  $\sigma_{-1} = (0.128-0.156)$  HB - for carbon steels (0.168-0.222) HB - for alloy steels;  $\sigma_{-1} = 0.19$ HB - for aluminum alloys.

It is known from modern fracture mechanics [2 – 4] that with increasing number of cycles at any stresses above the endurance limit in metal, the following processes occur sequentially: 1) plastic deformation; 2) the formation of cracks, the cells of which are non-metallic inclusions (HB); 3) gradual development of some of them with the predominant spread of the main crack; 4) rapid final destruction.

The process of fatigue begins with the plastic deformation of the surface layers of the metal fittings. Moreover, the displacement of dislocations under conditions of re-alternating loads is observed at loads below the elastic

limit of the metal. The rate of local plastic deformation during cyclic deformation is several orders of magnitude higher than the rate of deformation under static loading. Dislocation slip begins in grains with a favorable orientation near stress concentrators. As the number of cycles in the surface layers increases, the density of dislocations and the number of vacancies increases. Upon reaching the base number of cycles  $N_R$ , a surface reinforced layer of metal is formed with a large number of germinal cracks, the size of which does not reach a critical value. Increasing the number of cycles cannot cause further development of fracture in such a layer. Only when the stresses exceed the crack endurance limit reach a critical length [5, 6], after which the process of their discharge into the main crack begins with the spread of the latter.

## RESEARCH METHODS AND MATERIALS

As model media used: NACE medium (5% NaCl solution, which contained 0.5% CH<sub>3</sub>COOH and saturated H<sub>2</sub>S;  $t = 22 \pm 2$ °C;  $pH = 3.8...4.0$ ); The objects of research were the following steels: 16G2AF; 20F; 15HSNDA; 10HSNDA; 09G2FB; 06G2B and 08HMCHA.

He corrosion rate was determined using the gravimetric method: the test period was 480 hours. Samples cut directly from reinforcing bars with a diameter of 32 mm were also tested for susceptibility to hydrogen-induced fracture (BIR) according to the International Standard NACE TM-02-90, as such a test is mandatory when choosing a material for the manufacture of responsible hydraulic structures in contact with media, which contain hydrogen sulfide [1, 5].

The VIR of rectangular samples 80 mm long (along the rolling),  $W = 12$  mm wide (across the rolling) and thickness  $T$  (determined by the diameter of the reinforcement taking into account the allowance for machining to metallic luster), which were cut directly from the reinforcing bars after rolling. The test involves a 96-hour exposure of stressed samples in a synthetic solution of NACE (5%

NaCl solution + 0.5% CH<sub>3</sub>COOH, continuous saturation of H<sub>2</sub>S with a bubbling rate of 10 ml/min; pH = 3...4), and the minimum volume of the solution was 4 ml per 1 cm<sup>2</sup> of the sample surface [18]. Subsequently, the samples were cut, and the cut surface was polished and etched in a medium of chemical reagents. All detected at magnification x 100 cracks were measured, except those that were at a distance of up to 1 mm from the surface of the sample.

Based on the measurement results, the coefficients of sensitivity of steel to hydrogen-induced fracture were calculated according to the following formulas: coefficient of crack length CLR = (Σa/W) 100%; the coefficient of crack formation width CTR = (Σb/T) · 100%, where Σa and Σb are the sum of the longitudinal and transverse dimensions of the crack formation, respectively.

According to the International Specification, the following requirements for hydrogen resistance of tubular steels are set: for VIR – coefficients of crack length CLR ≤ 6% and crack thickness CTR ≤ 3%.

The susceptibility of reinforcing steels to sulfide corrosion fracture under stress (SCRN) was determined according to the standard NACE TM 01-77 (90) – method A (on cylindrical samples with a diameter of 6.4 mm), which allowed the thickness of the reinforcement section [11]. Samples were tested on the installation of the model "Instron" (UK) under load (in each experiment used 5 samples). The ultimate stress σ<sub>SSC</sub> was determined in order to compare the quality of steels of different brands and valves. Test conditions according to this standard are as follows: duration – 720 h in 5% NaCl solution containing 0.5% CH<sub>3</sub>COOH and saturated H<sub>2</sub>S; pH = 3; t = 22 ± 2oC.

The parameter σ<sub>SSC</sub> was determined from the dependence σ<sub>i</sub> – lgτ (σ<sub>i</sub> – initial load; τ – time to failure, h), at which the samples are not destroyed on the accepted time base of tests.

The graph of the dependence σ<sub>i</sub> – lgτ was built on the minimum values of time to failure under each load, because the use of average values of τ is unacceptable given the need for guaranteed performance of reinforced concrete structures in technological environments with

hydrogen sulfide. The shape and dimensions of the samples for fatigue (multicycle) tests are shown in Fig. 1.

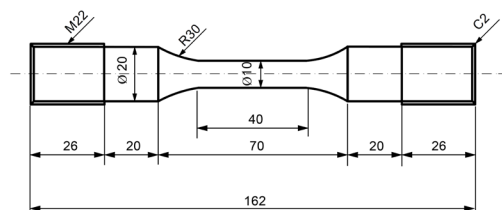


Fig. 1. Sample for tests for fatigue strength (fatigue)

Long-term strength (air tests) and corrosion-fatigue tests were performed on a weight-type installation USMR-6 under load (in each experiment used 5 samples). The basis was 1 1×10<sup>6</sup> cycles (see Fig. 2 and 3).

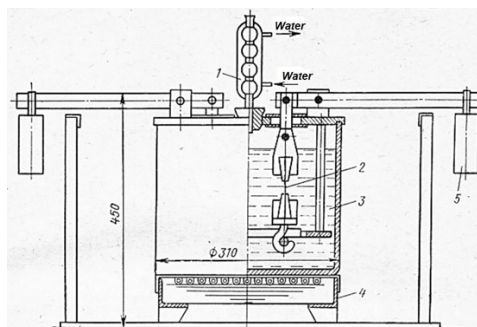


Fig. 2. Schematic diagram of the installation for uniaxial stretching. Designation: 1 - refrigerator; 2 - sample; 3 - capacity; 4 - furnace; 5 - cargo

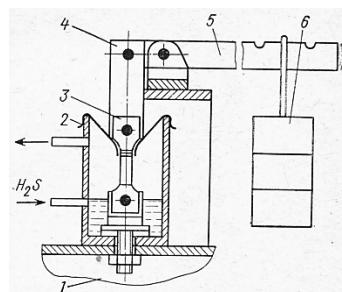


Fig. 3. Test cell in NACE medium (with hydrogen sulfide). Designation: 1 - basis; 2 - cell; 3 - sample; 4 - core; 5 - lever; 6 - cargo

Tests for sulfide cracking were performed according to the method according to the standard NACETM-01-90 [1]. NACE solution was used as the model medium. The basic test period is 720 hours. All samples were tested at a voltage equal to 0.8 of the yield strength of the metal reinforcement, which was determined by the rupture of three samples in air. Tests of samples with an annular groove in the middle were performed by the method of continuous deformation to failure (at low speed  $\epsilon = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) in a corrosive environment.

### The results of experimental research and their discussion

The results of measurements of the corrosion rate of metal samples of reinforcing steels in the model environment NACE are presented in Fig. 4. Analysis of the data in Fig. 4 shows that the highest corrosion resistance in this environment are characterized by economically modified vanadium, niobium, chromium, nickel and cerium steels, in particular 16G2AF, 09G2FB, 15HSNDA and 08HMCHA, less resistant to corrosion of steel grades 06G2B 10 20F.

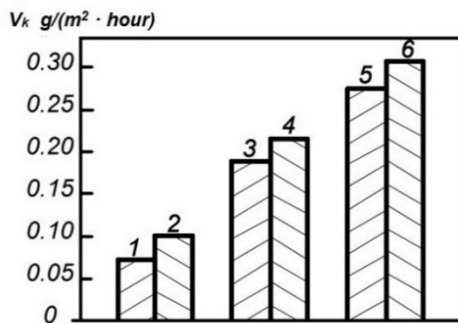


Fig. 4. Corrosion rate diagram of reinforcing steel samples in the NACE model environment. Numbering of samples and grades of steels: 1-16G2AF 2 - 09G2FB 3 - 15HSNDA 4 - 08HMCHA 5 - 06G2B 6 - 10HSNDA

### SKRN research

The tendency of reinforcing steels to SKRN is graphically shown in Fig. 5. It can be seen that the steels of the following grades 16G2AF, 09G2FB, 15HSNDA, 10HSNDA are

characterized by the greatest resistance of SKRN. Steels 20F, 08HMCHA and 06G2B have slightly lower resistance. It is seen that both in the resistance to the corrosion process and in the case of resistance to stress corrosion (SCRN) there is a complete analogy, ie the greatest resistance to SKRN is characterized by steels economically modified with vanadium, niobium, cerium and other useful elements [8 – 11].

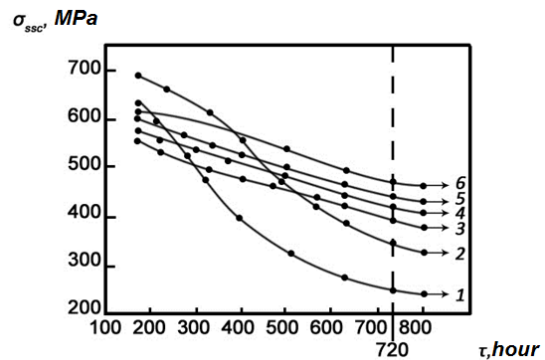
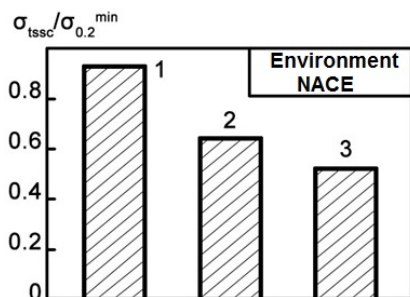


Fig. 5. Susceptibility to sulfide corrosion fracture under stress of reinforcing steels when tested in model environments. The numbering corresponds to the designation on Fig. 3

However, it should be noted that the absolute values of  $\sigma_{tssc}$  should not yet be used in the design of reinforced concrete structures for critical purposes, for example for hydraulic underground structures due to lack of reliable methods for determining and predicting their fatigue (long-term) strength, as they can change and carbon gas and their partial pressures, pH, ambient temperature, process stops, condition of structures, etc.) [4, 9, 12]. Therefore, in calculations of long-term strength and load-bearing capacity of reinforcing steels of reinforced concrete structures, determining the diameter of reinforcement, the initial parameter may be the minimum allowable value of the yield strength of steel  $\sigma_{min}$  0.2, and the suitability of structural materials is evaluated by ultimate stresses [10]:  $ktssc = \sigma_{tssc} / \sigma_{min} 0.2$  (Fig. 6).

It is considered that steel is suitable for the manufacture of fittings and operation in technological environments with a high content of corrosive components, including hydrogen

sulfide (up to 20 mol.%), When  $k_{tssc} \geq 0.8$  [10 – 12].



**Fig. 6.** Threshold values of resistance to sulfide corrosion failure under stress of reinforcing steels of reinforced concrete structures of long service life in the NACE environment: 1 - steel 16G2AF; 2 - 09G2FB 3 - steel 20F. The deviation of the values of  $\sigma_{tssc}$  does not exceed 10%

From the above experimental results it is seen that the highest corrosion resistance against SCRN is characterized by steel grade 16G2AF and 09G2FB, and steel grade 20F has low values of the coefficient  $k_{tssc} = 0.45...0.60$  (see Fig. 4). Thus, the performance of steels for reinforcing steels for construction purposes, which is estimated by the parameters  $k_{tssc}$  and  $\sigma_{tssc}$ , is different.

It should be noted that the results of the resistance study of SCRN steels correlate well with the data of the gravimetric corrosion rate determination method both in NACE solution and in NaCl solution (see Fig. 4).

Thus, it can be generalized that economicaly modified steels 16G2AF and 09G2FB, which contain low concentrations of harmful impurities of sulfur, phosphorus and hydrogen, are characterized by high resistance to uniform corrosion, including against SCRN, and therefore can be recommended for use in the production of reinforcement for reinforced concrete structures of hydraulic structures.

### VIR research

The results of VIR studies of reinforcing steel (without application of load) showed that in the NACE solution is hydrogen cracking

and surface swelling of some steels grade 06GB and 20F. The calculated values of VIR hydrogen cracking indicators for these steels are: CLR = 3.2...4.8%; CTR = 6.9...10.8%. It is established that steels 16G2AF, 09G2FB, 08HMCHA, 15HSNDA– meet the requirements of Technical conditions [11 – 17].

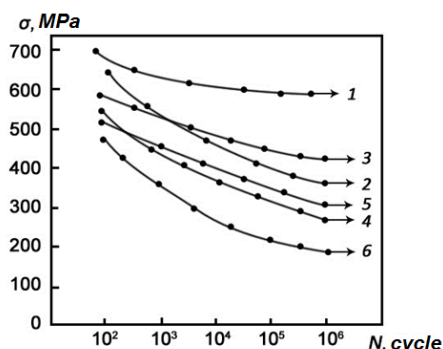
### Study of corrosion fatigue (long-term strength)

In the course of experimental researches the following (Fig. 7) is established:

1) NACE medium, which contains hydrogen sulfide, more than 1.75 times, reduces the fatigue limit of samples with a diameter of 5 mm from steel grade 09G2FB (from 700 to 400 MPa).

2) Hydrogen sulfide-containing medium NACE almost 5 times (from 490 to 200 MPa) reduces the fatigue limit of steel 10HSNDA.

3) The highest values of long-term strength showed experimental steels in NACE. Economical modification of REM steel (08HMCHA steel) allowed to increase the corrosion and fatigue strength even when tested in an aggressive NACE environment more than 2 times compared to conventional steel grade 10HSNDA (see Fig. 7). Thus, the conditional limit of corrosion fatigue of steels 15HSNDA and 06G2B in hydrogen sulfide-containing medium at 1 million cycles (base of many cycle tests) – (curves 4 and 6 in Fig. 7) increased from 190 to 280-290 MPa.

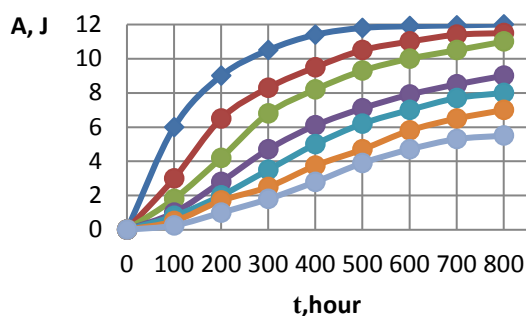


**Fig. 7.** Corrosion fatigue curves of reinforcing steel samples in NACE solution: See steel grade designation. Fig. 3

From the above experimental results it can be generalized that the positive effect of doping with modifying impurities is observed stably when using them in low-alloy steels in a limited amount mentioned above. Their further increase causes clogging of the metal with large particles of silicates or oxides and oxy-sulfides of cerium niobium and vanadium, without affecting the total number of non-metallic inclusions.

In domestic and foreign studies by a number of authors it is noted that the reasons for the decrease in resistance to SCR and VIR of some carbon and low-alloy steels may be the presence of silicates, as well as microleaching of individual alloying elements or impurities, or violation of thermomechanical modes of reinforcement rods [12, 13].

Therefore, the results of laboratory and experimental studies have shown that economically modified steels are characterized by high corrosion and fatigue strength and can be used in reinforced concrete structures in contact with aggressive environments of hydraulic systems. The obtained results of experimental researches can be useful for designers at development of projects on use of reinforced concrete products in hydraulic engineering constructions, for example, underground sewer systems, ie their careful check in the conditions of industrial construction is required [15 – 17].



**Fig. 8.** The work of corrosion destruction of reinforcement samples in the NACE environment. Designation of reinforcing steels: 1 - 16G2AF, 2 - 09G2FB, 3 - 15HSNDA, 4 - 08HMCHA, 5 - 06G2B, 6 - 10HSNDA, 7 - 20F

The results of tests of corrosion destruction of reinforcing steel samples in the NACE environment are shown in Fig. 8.

Analysis of the data shown in Fig. 8 makes it possible to note that the greatest resistance to sulfide-corrosion fracture have reinforcing steels brands 16G2AF, 09G2FB, 15HSNDA. The other brands 08HMCHA, 06G2B, 10HSNDA and 20F have less resistance to corrosion damage.

## CONCLUSIONS

1. The analytical inspection showed that at long service life of reinforced concrete designs of hydraulic engineering constructions their separate elements for example reinforcing cores are destroyed owing to insufficient fatigue-corrosion durability of metal of armature. They occur mainly under the action of the main variable loads - bending, vibrations of reinforced concrete slabs, mechanical and erosion of the environment. The main causes of failure of the valve are its rupture and wear due to repeated action of force factors. The surface zone of the reinforcement in connection with concrete is especially intensively destroyed due to weak adhesion strength. The use of low-strength reinforcing steels can also be one of the reasons for the failure of reinforcement joints with concrete.

2. Increasing the corrosion-mechanical reliability of reinforced concrete structures of hydraulic structures is possible through the use of: for the manufacture of reinforcing bars which are the main power structure of reinforced concrete economically modified alloy steels, which undergo complex heat treatment and are characterized by high corrosion-fatigue properties. cyclic (alternating) loads;

3. Resistance against SCR, VIR and corrosion-mechanical fatigue of reinforcing steels intended for the construction industry is investigated. It was found that the experimental steels, economically modified REE, copper-nickel, especially chromium niobium and vanadium meet the requirements of the International Standard NACE MR 0175-96 on chemical composition and mechanical properties, and steels of grades 10HSNDA and 20F do not

have a sufficiently high resistance SCRN (<limits · σ0.2min) and corrosion-fatigue failure, and steels of grades 20F and 06G2B showed low resistance to VIR (CLR> 6% and CTR> 3%). Therefore, it is necessary to carry out a full (100%) input control of corrosion and mechanical resistance of all materials involved in the manufacture of reinforced concrete structures for hydraulic purposes for operation in hydrogen sulfide-containing media.

REFERENCES

1. **Makhutov N.A., 1981.** Deformation criteria of destruction. *Mashinostroenie*, 272 (Russian).
2. **Archakov Yu.I., 1980.** Hydrogen corrosion of steel. *Metallurgy* (in Russian).
3. **Atomic mechanism of destruction, 1983.** Mir. 660 (in Russian).
4. **Kalachev B.A., 1985.** Hydrogen fragility of metals. *Metallurgy*, 216 (in Russian).
5. **Meshkov Yu.Ya., 1985.** Physical foundations of the strength of steel structures. Kiev, Naukova Dumka, 266 (in Russian).
6. **Petrov L.N., Sopronyuk N.G. 1988.** Corrosion-mechanical destruction of metals and alloys, Kiev, Naukova Dumka, 488 (in Russian).
7. **Moskvin V.M. , 1980.** Corrosion of concrete and reinforced concrete methods of their protection. *Stroyizdat*, 538 (in Russian).
8. **Makarenko V.D., Mangura A.M., Sizonenko A.V., Litvyak O.L. 2019.** Mechanisms of corrosion-carbon corrosion of structural pipe steels for naphtha and gas filling Modernization and engineering development of resource-saving technologies in the form of packaging and processing of brown copal ins. *Collective monograph. Petro Shan, Rumania, Universities Publishing*, 424 (57-70).
9. **Makarenko V., Vynnykov Y., Liashenko A., Petrash O., 2019.** Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Reconstruction, *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. ICBI Lecture Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Reconstruction Notes in Civil Engineering*, vol 73. Springer, Cham. 651-658.
10. **Boyko A.V., Makarenko V.D, Maximov S.Yu., 2021.** On some mechanical characteristics of structural steels of cooling systems of long operation. *Problems of durability*, No.2 (470), 77-81 (in Russian).
11. **Makarenko, V.D., & Morgun, I.D., 1991.** Special features of the effect of barium on the mechanical properties of metal deposited in welding with calcium fluoride electrodes. *Welding International*, 5(9), 726-728 (in Russian).
12. **Pokhodnya I.K., Ponomarev V.E., Milichenko S.S., Skorina N.V., Makarenko V.D., Marchenko A.E., & Gorpenyuk, V.N., 1987.** Effects of type of binder and its composition on the welding and properties of electrodes with basic coatings. *Welding International*, 1(2), 116-118 (in Russian).
13. **Kreshchanovsky I.S., Sidorenko M.F., 1970.** Modification of steel, *Metallurgy*. 296 (in Russian).
14. **NACE Standard TMO 177-90, 1990.** Standard Test Method Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking in H<sub>2</sub>S Environments, NACE Houston.P.O. Box 218340, 22.
15. **MSKR-01-85, 1985.** Test procedure for resistance to hydrogen sulfide stress corrosion cracking. Publishing house of the State Committee for Science and Technology of the USSR, 8.
16. **Makarenko V.D., Shatilo S.P., 1999.** Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*. 56-61 (in Russian).
17. **Makarenko V.D., Beljaev V.A., Protasov V.N., Shatilo S.P., 2000.** Mathematical model of the mechanism of resistance of welded joints in oil and gas pipelines to static hydrogen fatigue. *Welding International*, 83-88 (in Russian).
18. **Sukach M.K., 2018.** Theoretical foundations for the calculation of staple-shaped leaf springs. *Transfer of Innovative Technologies*, Vol.1, No.2, 40-50. [https://doi.org/10.31493/tit1812\\_0201](https://doi.org/10.31493/tit1812_0201).
19. **Horbatenko Y.G., 2020.** The production of the splash phenomenon, as a way of dissipating the energy of a gravitational wave. *Underwater Technologies*. Vol.10, 58-67.
20. **Sukach M.K., 2021.** The Staple-Shape Plate Springs Engineering Calculation Method. *Science and Technique*. 20 (3), 268-274, <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3>.

**Исследование коррозии и механической устойчивости арматурных сталей, предназначенных для эксплуатации в гидравлических сооружениях**

*Михаил Сукач, Мирослав Киндрачук,  
Валерий Макаренко*

**Аннотация.** Аналитическое обследование показало, что при длительном сроке эксплуатации железобетонных конструкций гидротехнических сооружений отдельные их элементы, такие как арматурные стержни, разрушаются из-за недостаточной усталостной и коррозионной стойкости металла арматуры. Они возникают в основном под действием основных переменных нагрузок – изгиба, вибрации железобетонных плит, механической и эрозии окружающей среды. Основные причины выхода клапана из строя – его разрыв и износ из-за многократного действия силовых факторов. Поверхностная зона арматуры в связи с бетоном особенно интенсивно разрушается из-за слабой прочности сцепления. Использование малопрочных арматурных сталей также может быть одной из причин разрушения стыков арматуры с бетоном. Повышение коррозионной и механической надежности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений возможно за счет применения: для изготовле-

ния арматурных стержней, являющихся основной силовой конструкцией железобетонных экономически модифицированных легированных сталей, которые проходят сложную термическую обработку и характеризуются высокой коррозионные и усталостные свойства. переменные и усталостные свойства. переменные) нагрузки; Изучена стойкость к SCRН, VIR и коррозионно-механической усталости арматурных сталей, предназначенных для строительной индустрии.

Установлено, что опытные стали, экономически модифицированные РЗЭ, медно-никелевые, особенно хромоникобий и ванадий соответствуют требованиям международного стандарта NACE MR 0175-96 по химическому составу и механическим свойствам, а стали марок 10ХСНДА и 20Ф не имеют достаточно высокое сопротивление SCRН < предела  $\cdot \sigma_{0,2min}$ ) и коррозионно-усталостное разрушение, а стали марок 20F и 06G2B показали низкую стойкость к VIR (CLR > 6% и CTR > 3%). Поэтому необходимо проводить полный (100%) входной контроль коррозионной и механической стойкости всех материалов, задействованных при изготовлении железобетонных конструкций гидравлического назначения для работы в сероводородсодержащих средах.

**Ключевые слова:** Коррозионное разрушение, затопление, трещиностойкость, выносливость, усталостная прочность.

## ВКАЗІВКИ ДЛЯ АВТОРІВ

### Правила публікації

До публікації приймаються оригінальні матеріали дослідницького та дискусійного характеру обсягом 8 – 12 сторінок (A4) включно з таблицями, рисунками та списком літератури. Статті (переважно індивідуальні, англійською мовою, склад авторів не більше 3, джерел не менше 20) підлягають подвійному рецензуванню, у тому числі залученими редакцією незалежними фахівцями, та [цифровій ідентифікації DOI](#). Дописувачі передають видавцеві авторське право на тексти та письмові дозволи для відтворення рисунків і таблиць з неопублікованих раніше або захищених авторським правом матеріалів. Редакція дотримується етичних норм наукової публікації

До статті додають ([uwtech@ukr.net](mailto:uwtech@ukr.net)) **Заяву про публікацію** (7 файлів в архіві *Документи*):

- 1) інформацію **про статтю** – форма 1 (word)
- 2) довідку **про авторів** (Статус: h-index, прізвище, ім'я, по-батькові; науковий ступінь, вчене звання, місце роботи, адреса, посада; Контакти: фото автора (.jpg), мобільний телефон, e-mail, ідентифікатори ORCID та Scopus Author ID) – форма 2 (word)
- 3) дві зовнішні **рецензії** – форма 3
- 4) експертний **висновок** – форма 4
- 5) **угоду** про вільне використання авторського права – форма 5
- 6) завірений **переклад** статті англійською мовою
- 7) **рекомендацію** до друку (витяг з протоколу установи, де працює автор)

### Вимоги до статті

#### Загальні положення:

- параметри аркуша: формат A4, верхнє та нижнє поля 2,5 см, ліве та праве 2 см; шрифт Times New Roman; колонтитули 1,3 см, абзацний відступ 0,5 см; розмір основного тексту 12, анотацій і літератури 11, міжрядковий інтервал 1
- статтю (.doc) форматують у дві колонки по 8 см з проміжком 1 см; встановлюють автоматичне перенесення слів
- назви таблиць та підписи під рисунками (розмір 11) розміщують ліворуч графічного об'єкту; в кирилических текстах – дублюють англійською (рядком нижче)
- в списку літератури – не менше 20 посилань (переважно на наукові статті та монографії); після прізвища зазначають рік видання (стандарт APA)
- список літератури дублюють англійською; якщо використовується <http://translit.net> (крім назви джерела, яку перекладають дослівно), в дужках вказують мову оригіналу, наприклад (in Ukrainian), (in Russian), (in Poland)
- посилаючись на інтернет-ресурс, слід вказувати повну назву і вихідні дані публікації
- в кінці англійських статей дають анотацію російською; в інших статтях – англійською

#### Структурування:

- вихідні дані (шрифт Arial): назва рукопису (н/ж, ф.14), ім'я та прізвище автора (курсив, ф.12), місце роботи, поштова адреса, e-mail, ідентифікатор ORCID (ф.10); якщо авторів декілька – зазначають цифровими зносками; залишають по 5 пустих рядків між верхнім полем аркуша, вихідними даними і основним текстом статті
- структурні підрозділи статті:
  - АНОТАЦІЯ (не менше 1800 знаків – 0,5 стор. ф.11)
  - КЛЮЧОВІ СЛОВА (5 – 8 слів)
  - ВСТУП
  - МЕТА І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ
  - РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ
  - ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ
  - ПОДЯКА (за потреби)
  - ЛІТЕРАТУРА
- назва статті – інформативна та коротка; структура анотації – аналогічна структурі статті, без використання скорочень та абревіатур, усі пояснення дають в тексті; посилання – не більше 5 джерел в одному місці
- таблиці та рисунки розміщують після першого згадування про них, а великі (на повну ширину аркуша) – зверху або знизу сторінки (не розриваючи одночасно обидві колонки тексту)
- ілюстрації – у форматах .jpg, .tif з роздільною здатністю не менше 300 dpi

#### Оформлення:

- пишуть прямо – цифри, грецькі букви, кирилицю, тригонометричні функції (tan, sin та ін.), усталені вирази (max, const та ін.), хімічні елементи; курсивом – англійські символи формул, римські цифри, номери експлікації
- між формулами, рисунками, таблицями і текстом залишають по 1 пустому рядку
- формули (розміром 12-9-7-16-12) набирають в MathType і центрують; нумерація – праворуч колонки; таблиці і рисунки – не перевищують область друку аркуша
- скорочені слова «Табл.» (Table), «Рис.» (Fig.) пишуть з великої букви (в тексті – світло, в назві – н/ж); текст на полі рисунків зводять до мінімуму, пояснення дають в підписах під рисунками
- в якості розділових знаків у списку літератури використовують тільки крапку і кому (стандарт APA); кількість сторінок (діапазон) вказують без їх позначення
- приклади оформлення статей і архів журналу – див. [www.uwtech.at.ua](http://www.uwtech.at.ua), <http://library.knuba.edu.ua/node/867>



Заява про публікацію  
в міжнародному науковому журналі

(назва журналу)

Форма 1

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Мова статті	Автор(и) (ім'я, прізвище – мовою статті)  (предметна галузь) / (к-сть стор.)	Документи (+/-) *							Назва статті	Замовлення (к-сть прим.)
		Про статтю (ф.1)	Про авторів (ф.2)	Дві рецензії (ф.3)	Експ. висновок (ф.4)	Угода про публ.(ф.5)	Завірений переклад	Рекомендація		
		1	2	3	4	5	6	7	Рецензенти (ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання – мовою статті)	Оплата (грн.) Дата
										Підпис
									Рец. 1:  Рец. 2:	

\* – наявність зазначити позначкою

Форма 2

ДОВІДКА ПРО АВТОРІВ  
(мовою статті)

h-index (Scopus)	Статус		Контакти	
	Прізвище, ім'я, по батькові науковий ступінь, вчене звання	Місце роботи, посада адреса, поштовий індекс контактний телефон	Фото автора (.jpg, 300 dpi)	Моб. тел. E-mail, ORCID Scopus Author ID Researcher ID

РЕЦЕНЗІЯ

(дві, зовнішні)

Повинна містити:

- 1) Назву статті, Ім'я та Прізвище автора(ів)
- 2) Оцінку праці (оригінальність; відповідність назви й тексту статті; методи і мета праці; термінологія; стиль викладення; граматики)
- 3) Інформацію про Якість статті (по суті й перекладу англійською) та відсутність Плагіату
- 4) Зауваження й Корективи (або вказування на необхідність передачі статті іншому рецензенту)
- 5) Рекомендацію (до опублікування; подальшого опрацювання; повторного рецензування; відмовлення у публікації)
- 6) Відомості про рецензента (ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання, місце роботи – мовою статті)
- 7) Дату, Підпис (завірений)

(зразок)

ЗАТВЕРДЖУЮ

(посада, науковий ступінь,  
вчене звання)

П.І.Б.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

ЕКСПЕРТНИЙ ВИСНОВОК № \_\_\_\_

про можливість опублікування матеріалів  
у пресі та інших джерелах інформації

Експертна комісія Київського національного університету будівництва і архітектури, розглянувши матеріали рукопису

\_\_\_\_\_  
(ім'я, прізвище автора(ів))

\_\_\_\_\_  
(назва статті)

в обсязі \_\_\_\_ сторінок, зазначає, що в них немає відомостей, які б підлягали забороні до опублікування згідно «Розгорнутого переліку відомостей, що становлять державну таємницю у Міністерстві освіти і науки України – 2001 р.»

Висновок: матеріали рукопису дозволяється опублікувати відкрито

Керівник експертної групи

П.І.Б.

УГОДА № \_\_\_\_\_

про вільне використання авторського права щодо періодичного видання

м. Київ (назва журналу) «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Редакцією журналу *Підводні технології: промислова та цивільна інженерія (Transfer of Innovative Technologies)*, засновником якого є Київський національний університет будівництва і архітектури з юридичною адресою: КНУБА, Повітрофлотський проспект 31, Київ, Україна, 03037, в особі головного редактора д.т.н., професора М.К. Сукача, з однієї сторони (далі – Редакція), та власник(и) майнових авторських прав в особі

\_\_\_\_\_  
(П.І.Б.) (науковий ступінь, звання) (ORCID)

\_\_\_\_\_  
(П.І.Б.) (науковий ступінь, звання) (ORCID)

\_\_\_\_\_  
(П.І.Б.) (науковий ступінь, звання) (ORCID)

з іншої сторони (далі – Автор(и)), які разом іменуються Сторони, керуючись Цивільним кодексом, Законом України «Про авторське право і суміжні права», іншими законодавчими і нормативно-правовими актами України, уклали цю Угоду про наступне.

п.1

1.1. Автор(и) заявляють, що вони є дійсними авторами наукового Твору/Статті під назвою

\_\_\_\_\_  
(мовою оригіналу)

який є результатом їхньої спільної творчої праці, і що вони мають відносно зазначеного твору виключне авторське право.

1.2. Автор(и) заявляють, що Твір/Стаття не порушує авторські права будь-якої третьої сторони, не містить будь-яких запозичень (плагіату) та немає ніяких інших обставин, які можуть наразити Редакцію до будь-якої відповідальності перед третьою стороною в результаті використання або публікації Твору/Статті.

1.3. Автор(и) заявляють, що у них є право розпоряджатися матеріалами, які містяться у Творі/Статті, зокрема текстами, фотографіями, картами, планами та ін., і що використання цих матеріалів у Творі/Статті не порушує права третьої сторони.

1.4. Автор(и) заявляють, що вони знайомі з вимогами оформлення статей. Текст Твору/Статті підготовлено згідно з редакційними вимогами стосовно публікації у періодичному виданні *Підводні технології: промислова та цивільна інженерія (Transfer of Innovative Technologies)*.

1.5. Автор(и) заявляють, що Твір/Стаття не було опубліковано раніше в цілому або частинами (чи під тією ж або іншою назвою), і що його не було передано для публікації будь-якому іншому періодичному виданню згідно Закону України «Про авторське право і суміжні права».

п.2

2.1. Автор(и) надають Редакції вільно і без будь-яких обмежень на територію, час і кількість копій повне авторське право на Твір/Статтю з метою його опублікування у періодичному виданні *Підводні технології: промислова та цивільна інженерія (Transfer of Innovative Technologies)* в друкованому та електронному вигляді з наступними умовами використання:

- а) збереження на будь-яких носіях/медіа
- б) розмноження Твору/Статті, його частин або фрагментів будь-якими відомими методами, копіювання Твору/Статті або його частин та фрагментів будь-якою технікою, зокрема друкуванням, різнографією, магнітним записом та оцифруванням
- в) збереження на комп'ютері та розміщення у приватних і громадських комп'ютерних мережах (у тому числі Інтернет) і поширення через мережі
- г) розповсюдження оригіналу і/або копій Твору/Статті, окремих його частин або фрагментів, розповсюдження та передача в користування оригіналу або його примірників.

2.2. Автор(и) погоджуються на те, що редакторське опрацювання і тиражування періодичного видання здійснюється за кошти добровільних внесків Авторів публікацій.

п.3

3.1. Автор(и) та Редакція згодні на те, що Редакція також матиме право:

- а) здійснювати необхідне оформлення Твору/Статті за результатами його редакційної обробки
- б) визначати самостійно кількість видань, друк додаткових копій і тираж Твору/Статті, кількість копій окремих видань і додаткових тиражів
- в) опублікування Твору/Статті в інших виданнях, пов'язаних з діяльністю Редакції, ніж вказаних у п.2.1.

п.4

4.1. Автор(и) та Редакція спільно засвідчують, що вільне використання авторських прав в межах цієї угоди є безкоштовним.

4.2. Будь-які зміни до цієї Угоди мають бути складені у письмовій формі.

4.3. Питання, не врегульовані положенням цієї Угоди, підлягають правилам Цивільного кодексу та Закону України «Про авторське право і суміжні права».

4.4. Будь-які суперечки, які можуть виникнути під час виконання та протягом терміну дії цієї Угоди вирішуватимуться в межах територіальної юрисдикції за місцем знаходження Редакції.

Угоду складено у 2 (двох) ідентичних примірниках, по одному зі Сторін.

АВТОР(И):

РЕДАКЦІЯ:

1. \_\_\_\_\_  
(підпис) (П.І.Б.)

2. \_\_\_\_\_  
(підпис) (П.І.Б.)

3. \_\_\_\_\_  
(підпис) (П.І.Б.)

міжнародний науковий журнал  
*Підводні технології: промислова та цивільна інженерія (Transfer of Innovative Technologies)*

Повітрофлотський проспект 31,  
Київ, Україна, 03037  
[uwtech@ukr.net](mailto:uwtech@ukr.net) ([tit.edit@ukr.net](mailto:tit.edit@ukr.net))

\_\_\_\_\_ М.К. Сукач

Наукове видання

# ПІДВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОМИСЛОВА ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

Випуск 11 (2021)

**Статті публікуються в авторській редакції**

- ▶ Оформлення, стиль та зміст журналу є об'єктом авторського права і захищається законом
- ▶ Відповідальність за зміст та достовірність наведених даних несуть автори публікацій
- ▶ Редакція залишає за собою право редагувати та скорочувати подані матеріали
- ▶ Статті одержали позитивну оцінку незалежних рецензентів
- ▶ Передрук розміщених у журналі матеріалів дозволяється тільки за письмовою згодою редакції

**Рецензенти статей:**

Oleksandr Bezverkhy	Dr.Phys. and Math.Sc., Prof.
Oleg Gibalenko	Dr.Tech.Sc., Prof.
Stanislav Fic	Dr.hab, Prof.
Mykola Kuz	Dr.Tech.Sc, Prof.
Jurij Kuskov	Dr.Tech.Sc., Prof.
Oleg Limarchenko	Dr.Tech.Sc., Prof.
Alexey Panasenko	Dr.Tech.Sc., Prof.
Olexandr Razmyshlyayev	Dr.Tech.Sc., Prof.
Sergii Zikratyi	PhD, Ass. Prof.

**Журнал індексується у базах даних:**

Google Academy	<a href="http://scholar.google.com.ua">http://scholar.google.com.ua</a>	CrossRef	<a href="https://www.crossref.org">https://www.crossref.org</a>
Index Copernicus	<a href="http://www.journals.indexcopernicus.com">www.journals.indexcopernicus.com</a>	Ulrichs Web	<a href="http://ulrichsweb.serialssolutions.com">http://ulrichsweb.serialssolutions.com</a>
Web ИРБИС	<a href="http://irbis-nbuv.gov.ua">http://irbis-nbuv.gov.ua</a>		

**Оригінал-макет виготовлено в редакції журналу**  
**Підводні технології: промислова та цивільна інженерія**

Відповідальний за випуск	<i>Дмитро Міщук</i>
Технічний редактор	<i>Олександр Марченко</i>
Лінгвістичний консультант	<i>Валерій Гастінщikov</i>
Комп'ютерне верстання	<i>Лев Сукач</i>
Редагування і коректура	<i>Олександра Даніліна</i>
Макетування і обкладинка	<i>Тетяна Роценко</i>

**Редакція журналу**

КНУБА, Повітрофлотський просп. 31  
лаб. корп., оф. 2313, Київ, Україна, 03037  
+38 044 2454217, +38 095 6297417  
[www.uwtech.at.ua](http://www.uwtech.at.ua), [uwtech@ukr.net](mailto:uwtech@ukr.net)

**Видавець і виготовлювач**

ТОВ ЦП КОМПРИНТ  
вул. Предславінська 28, Київ, Україна, 03150  
Свідоцтво ДК № 4131 від 04.08.2011 р.  
+38 044 5280542, +38 067 2095430  
[komprint@ukr.net](mailto:komprint@ukr.net)

Підписано до друку 08.10.2021. Формат 60×84 1/8  
Папір офсетний. Друк офсетний. Гарнітура Times New Roman  
Ум.-друк. арк. 12,09. Наклад 100 прим.