



КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ
НАУК УКРАЇНИ

Том 30
2(147)
2024

SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ ✦ ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. ✦ ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ НА РІК ✦ КИЇВ

ЗМІСТ

Динаміка та управління космічними апаратами

Khoroshylov S. V., Wang C. Spacecraft relative on-off control via reinforcement learning 3

Космічні енергетика і двигуни

Abada O., Kbab H., Haif S. Optimizing the Design of a Supersonic Planar Dual Bell Nozzle 15

Космічні матеріали та технології

Husarova I., Osinovyv G., Potapovykh L. Technology for water mining on the Moon without ice phase change . . . 28

Коментарі 38

*Лобанов Л. М., Ланкін Ю. М., Терновий Є. Г., Піс-
кун Н. В., Глушак С. О., Соловійов В. Г., Семікін В. Ф.,
Федорчук В. Є., Статкевич І. І.* Елементи технології
електронно-променевого зварювання алюмінієвих
сплавів для монтажних і ремонтно-відновлюваних
робіт на поверхні Місяця. 40

*Шувалов В. О., Письменний М. І., Токмак М. А., Кула-
гін С. М., Різниченко М. П.* Моделювання взаємодії
полімерів космічних апаратів з атомарним киснем
на низьких навколоземних орбітах 54

CONTENTS

Spacecraft Dynamics and Control

Khoroshylov S. V., Wang C. Spacecraft relative on-off control via reinforcement learning 3

Space Energy, Power and Propulsion

Abada O., Kbab H., Haif S. Optimizing the Design of a Supersonic Planar Dual Bell Nozzle 14

Space Materials and Technologies

Husarova I., Osinovyv G., Potapovykh L. Technology for water mining on the Moon without ice phase change . . . 28

Comments 38

*Lobanov L. M., Lankin Yu. M., Ternovyi Y. H., Pis-
kun N. V., Hlushak S. O., Solovyov V. G., Semikin V. F.,
Fedorchuk V. E., Statkevych I. I.* Elements of technology
of electron beam welding of aluminum alloys for instal-
lation and repair and restoration work on the surface of
the Moon 40

*Shuvalov V. O., Pismennyi M. I., Tokmak M. A., Kula-
gin S. M., Reznichenko M. P.* Simulation spacecraft poly-
mers – atomic oxygen interaction at low orbit 54

Дослідження Землі з космосу

Азімов О. Т., Томченко О. В., Шевченко О. Л., Кіреєв С. І. Моніторинг гідроресурсів радіаційно забруднених осушувальних систем за комплексом даних космічних зніманих і наземних спостережень (у контексті регіональних змін клімату)

69

Астрономія й астрофізика

Syniavskiy I. I., Castro-Tirado A. J., Ivanov Yu. S., Guziy S. S., Oberemok Ye. A. A wide-angle Stokes polarimeter for the BOOTES global telescope network. Optical and mechanical design

93

Study of the Earth from Space

Azimov O. T., Tomchenko O. V., Shevchenko O. L., Kireev S. I. Water resource monitoring for the drainage systems contaminated by radiation based on the complex of satellite imaging and ground observations (in the context of regional climate changes)

69

Astronomy and Astrophysics

Syniavskiy I. I., Castro-Tirado A. J., Ivanov Yu. S., Guziy S. S., Oberemok Ye. A. A wide-angle Stokes polarimeter for the BOOTES global telescope network. Optical and mechanical design

93

На першій сторінці обкладинки — Карта розподілу водню на Північному та Південному полюсах Місяця (див. статтю Husarova I. O., Osinovy G. G., Potapovych L. P. Technology for water mining on the Moon without ice phase change, С. 28–39)

Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких публікуються результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних, технічних, біологічних, геологічних та юридичних наук

Відповідальний секретар редакції О.В. КЛИМЕНКО

Адреса редакції: 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54
тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: reda@mao.kiev.ua
Веб-сайт: space-scitechjournal.org.ua

Ідентифікатор медіа R30-01479

Підписано до друку 00.00.2024. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон.
Ум. друк. арк. 11,34. Обл.-вид. арк. 11,97. Тираж 50 прим. Зам. № 0000.

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України
вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01024

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.003>
UDC 629.78

S. V. KHOROSHYLOV¹, Leading Researcher, Dr. Sci. in Tech., Professor
ORCID.org/0000-0001-7648-4791

E-mail: skh@ukr.net

C. WANG², Professor, PhD

ORCID.org/0000-0002-1358-7731

E-mail: wangcq@nwpu.edu.cn

¹Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine
15 Leshko-Popel Str., Dnipro, 49005 Ukraine

²Northwestern Polytechnical University

127 West Youyi Road, Xi'an Shaanxi, 710072, P.R. China

SPACECRAFT RELATIVE ON-OFF CONTROL VIA REINFORCEMENT LEARNING

The article investigates the task of spacecraft relative control using reactive actuators, the output of which has two states, “on” or “off”. For cases where the resolution of the thrusters does not provide an accurate approximation of linear control laws using a pulse-width thrust modulator, the possibility of applying reinforcement learning methods for direct finding of control laws that map the state vector and the on-off thruster commands has been investigated. To implement such an approach, a model of controlled relative motion of two satellites in the form of a Markov decision process was obtained. The intelligent agent is presented in the form of “actor” and “critic” neural networks, and the architecture of these modules is defined. It is proposed to use a cost function with variable weights of control actions, which allows for optimizing the number of thruster firings explicitly. To improve the control performance, it is proposed to use an extended input vector for the “actor” and “critic” neural networks of the intelligent agent, which, in addition to the state vector, also includes information about the control action on the previous control step and the control step number. To reduce the training time, the agent was pre-trained on the data obtained using conventional control algorithms. Numerical results demonstrate that the reinforcement learning methodology allows the agent to outperform the results provided by the linear controller with the pulse-width modulator in terms of control accuracy, response time, and number of thruster firings.

Keywords: on-off control, reinforcement learning, spacecraft relative control, actor, critic, neural network, thruster firing.

1. INTRODUCTION

Recently, on-orbit servicing missions [19] have attracted significant attention in the space community. For example, such missions can be used to replace or repair faulty spacecraft components, refuel in orbit, and remove space debris [1, 9]. To implement such operations, the service spacecraft (SSC) needs to perform maneuvers in close proximity to a servicing ob-

ject (SO), solving the tasks of relative guidance and control [13]. Thrusters (TH) are usually used to control the SSC relative motion. Unlike other actuators, such as reaction wheels, the output of a TH has two values: on or off. This mode of operation is explained by the fact that precise adjustment of thrust is difficult to implement, mainly because of dirt particles, which prevent the small valve from being completely closed. This, in turn, leads to leakage of the propellant

Цитування: Khoroshylov S. V., Wang C. Spacecraft relative on-off control via reinforcement learning. *Space Science and Technology*. 2024. **30**, № 2 (147). P. 3–14. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.003>

© Publisher PH «Akadempriodyka» of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

and the engagements of the THs, pointed in opposite directions. A TH operating in this mode is a significantly nonlinear actuator, which complicates the direct synthesis of control laws [3, 16].

Some of the first control algorithms using on-off actuators [25] were based on the Lyapunov stability theory, where the TH firing is selected by minimizing the derivative of the Lyapunov function. However, such control algorithms do not minimize a practically meaningful performance criterion, such as propellant consumption and control error.

To overcome the issue, it is often necessary to synthesize a linear control law that minimizes a selected performance criterion. After that, modulators are used to approximate the linear control by generating a sequence of thrust pulses with the required width, as mentioned in references [2, 17]. For this task, pulse-width (PWM) and pulse-width pulse-frequency (PWF) modulators are used [28]. The control system design is easier with PWM than with PWF since the first one only introduces additional damping, and the second one changes the bandwidth and phase characteristics of the system closed-loop.

Control performance within the PWM approach largely depends on the approximation accuracy of the linear control by the sequence of pulses after the modulator. Ref. [11] investigates the optimal time delay of the pulse, expressed as the error between the output states without and with PWM. The results of this work suggest to center the pulse within the sample period. In addition to pulse centering, the authors of the article [5] suggest dividing the pulse into several smaller pulses, which are uniformly distributed over the sampling period. However, this gives only a marginal improvement but requires THs with a much longer operational lifetime. Such insignificant improvements do not justify the qualification of the THs for a significantly greater number of work cycles.

To provide precise control, it is recommended that the PWM must have a resolution that is 50–100 times greater than the sampling period. If the modulator has an insufficient resolution, then control performance degrades. In addition to the issue, the above approach does not allow designers to explicitly optimize the number of TH firings.

The impressive results obtained using deep learning (DL) techniques [4] recently boosted interest in

artificial intelligence methods [6] among researchers and practitioners in the world. DL is rapidly developing and demonstrating promising capabilities in solving complex tasks and finding non-trivial solutions to existing problems [27].

Machine learning is a subset of artificial intelligence methods that are used to develop algorithms capable of solving a problem based on the search for regularities in various input data [20]. Machine learning methods based on artificial neural networks (NNs) are called deep learning. Recent advances in DL are largely achieved due to the development of new NN architectures.

Not so long ago, these methods were begun to be used to solve space-related tasks [12, 15]. In Ref. [22], the policy for performing docking maneuvers with six degrees of freedom was developed based on reinforcement learning (RL) and implemented in the form of the feedback control law. The simulation results of the approach and docking maneuvers for the Apollo mission demonstrate that the capabilities of the resulting policy can be compared with the algorithms obtained by conventional optimal control methods.

The article [14] presents an approximation of the optimal relative control for the underactuated spacecraft using the RL and the study of the influence of various factors on the performance of such a solution. This approach allows finding close to optimal control algorithms as a result of the interaction of the control system with the plant using the reinforcement signal to estimate the performance of the control actions.

A new approach called deep guidance is investigated in Ref. [10]. The authors use deep RL to learn guidance policies instead of handcrafting them. The results show that such a system can be fully simulated and transferred into real-world conditions with an acceptable loss of performance without any additional tuning. Ref. [7] proposes a new adaptive guidance system developed using meta-RL. The recurrent NN allows the obtained algorithms to adapt in real time to environmental disturbances acting on the SC. In Ref. [8], an adaptive integrated guidance, navigation, and control system was developed for maneuvering in the proximity of asteroids with unknown environmental dynamics, with initial conditions covering large launch areas, and without knowing the model

of the asteroid shape. The system is implemented as a policy optimized using meta-RL.

Unfortunately, at present, there are no results demonstrating the successful application of RL methods for on-off SSC relative control. At the same time, this approach may provide the following benefits:

1. A better control performance compared to the conventional PWM-based approach.

2. To optimize the frequency of the TH firings.

Such an RL-based approach is investigated in this article, for the implementation of which the following tasks are solved:

1. To build a model of the plant dynamics in a form that allows an RL-based algorithm to be applied.

2. To select the structure and parameters of the intelligent agent (AI).

3. To train the intelligent agent.

4. To analyze the performance of the RL-based controller for SSC relative control.

2. MODEL OF SPACECRAFT RELATIVE DYNAMICS

An orbital reference frame (ORF) $Oxyz$ is used for the mathematical description of the SSC motion relative to the SO. The origin of the ORF coincides with the center of mass of the SSC. The axis Ox coincides with the direction of the position vector, which determines the SSC center of mass relative to the Earth center of mass, the Oz axis coincides with the normal to the plane passing through the axis Ox and the vector of the SSC orbital velocity, and points towards the positive values of the orbital angular momentum. The axis Oy complements the reference frame to the right one.

The position of the SO relative to the ORF is determined by the position vector L . The relative dynamics of the “SSC — SO” system can be described using the following linearized system of equations [29]:

$$\ddot{x} - \omega^2 x - 2\omega\dot{y} - \dot{\omega}y - kx = \frac{f_x^d}{m^d} - \frac{f_x^s}{m^s}, \quad (1)$$

$$\ddot{y} - \omega^2 y + 2\omega\dot{x} + \dot{\omega}x + ky = \frac{f_y^d}{m^d} - \frac{f_y^s}{m^s}, \quad (2)$$

$$\ddot{z} + kz = \frac{f_z^d}{m^d} - \frac{f_z^s}{m^s}, \quad (3)$$

where x, y , are the projections of the vector L on the ORF axes; m^s, m^d are the mass of SSC and SO, re-

spectively; f_x^d, f_y^d, f_z^d are the ORF projections of the total force vector F^d , acting on the SO; f_x^s, f_y^s, f_z^s are the ORF projections of the total vector F^s , acting on the SSC.

The total force vector F^s includes control thrust and external disturbances acting on the SSC. The forces F^d and F^s may also include J2-disturbances, the gravity of the Sun and the Moon, atmospheric drag, and solar radiation pressure.

The parameters $\omega, \dot{\omega}$ and k in Eq. (1)–(3) are determined as follows:

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{\mu}{p^3}}(1 + \varepsilon \cos v), \\ \dot{\omega} &= -2\varepsilon \sqrt{\frac{\mu}{p^3}} \sin v (1 + \varepsilon \cos v) \omega, \\ p &= a(1 - \varepsilon^2), \\ k &= \frac{\mu}{r^3}, \\ r &= \frac{a(1 - \varepsilon^2)}{1 + \varepsilon \cos v}, \end{aligned}$$

where μ is the Earth’s gravitational constant, ε is the orbit eccentricity, v is the true anomaly, a is the semi-major axis, r is the orbital radius.

Equations (1) and (2) describe the dynamics of the system in the orbital plane, and (3) describes its motion out of the orbital plane.

Neglecting the influence of external disturbances and considering the state vectors

$$X_{in} = [x, y, \dot{x}, \dot{y}]^T, \quad X_{out} = [z, \dot{z}]^T,$$

and control

$$U_{in} = [u_x, u_y]^T, \quad U_{out} = u_z,$$

model (1) can be represented in the state space form as

$$\begin{aligned} \dot{X}_{in} &= A_{in} X_{in} + B_{in} U_{in}, \\ \dot{X}_{out} &= A_{out} X_{out} + B_{out} U_{out}, \end{aligned} \quad (4)$$

where

$$A_{in} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \omega^2 + 2k & \dot{\omega} & 0 & 2\omega \\ -\dot{\omega} & \omega^2 - k & -2\omega & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{in} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{m^s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m^s} \end{bmatrix},$$

$$A_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{out} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m^s} \end{bmatrix}.$$

The magnitudes of various components of the state vector are significantly different. This can complicate the training of the NNs. To eliminate this issue, the state vector is normalized as follows:

$$X_{in}^n = [x/x_m, y/y_m, \dot{x}/\dot{x}_m, \dot{y}/\dot{y}_m]^T, \quad (5)$$

$$X_{out}^n = [z/z_m, \dot{z}/\dot{z}_m]^T,$$

where $x_m, y_m, z_m, \dot{x}_m, \dot{y}_m, \dot{z}_m$, are the maximum values of the corresponding states. For the normalized state vector, the dynamic model has the following form:

$$\dot{X}^n = A^n X^n + B^n U, \quad (6)$$

where

$$A^n = N^{-1} A N, \quad B^n = N^{-1} B,$$

$$N = \text{diag}(x_m, y_m, z_m, \dot{x}_m, \dot{y}_m, \dot{z}_m).$$

Since the modern controller of the spacecraft is implemented as a discrete computer system, the following discrete form of the model (6) is used:

$$X_{k+1} = A_k X_k + B_k U_k, \quad (7)$$

where $A_k = (I + A^n T), B_k = B^n T, T$ is the sampling time, k is the sample number.

We also assume that the full state vector is measurable and that these measurements are not corrupted by noise.

3. DISCRETE LINEAR QUADRATIC REGULATOR WITH PWM

For comparison reasons, we consider one of the conventional approaches for spacecraft relative control, namely the combination of a linear-quadratic regulator (LQR) with PWM. Methods of synthesis of the optimal linear-quadratic controller with discrete

time (DLQR) [26] are a widely used methodology for designing control systems (SC). The goal of the DLQR synthesis is to find a constant gain matrix K for the full feedback law that minimizes the quadratic cost function:

$$J = \min \sum_{k=0}^{\infty} (Q^T X_k Q + R^T U_k R), \quad (8)$$

where Q, R are the weight matrices that penalize system states X_k and control U_k , respectively.

The impressive robust stability properties of DLQR allow developers to use it for systems whose real parameters differ significantly from the nominal ones. DLQR implements the control law with full feedback for SSC in the following form:

$$u_k = K(X^r - X_k),$$

where X^r is the reference value of the state vector, which determines the necessary relative position between the SSC and SO.

The matrix of the optimal feedback gain is determined as follows

$$K = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A,$$

where A, B are the matrices of the state space representation of the dynamic model, P is a unique semi-definite solution of the discrete-time Riccati equation

$$P = Q + A^T P A - A^T P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P A.$$

When the output of the actuators has only two states, on and off, the DLQR is used in conjunction with PWM, which approximates the output of DLQR by a sequence of pulses of variable width. The pulse width on each sample period is determined as follows:

$$t_f = \frac{u_k}{u_f} T, \quad t_f \leq T,$$

where u_f is the nominal thrust of a TH.

4. REINFORCEMENT LEARNING BASED CONTROL

The RL-based control setup assumes that the control system learns by analyzing the results of its actions [27]. These results are evaluated by a scalar signal (reinforcement), which is received from the plant with which the control system interacts. The reinforcement signal can be interpreted as a criterion allowing the intelligent control system to change its control algorithms, taking into account the achievement of the long-term goal.

A general RL algorithm includes the following steps:

- 1) at a time t_k , the plant is in a state X_k ;
- 2) in this state, the control system selects one of the possible control actions U_k ;
- 3) the control system applies this action, which leads to the transition of the plant to a new state X_{k+1} , and the control system receives the reinforcement signal C_k ;
- 4) the algorithm continues being applied from step 2, taking into account the received reinforcement, or the algorithm stops if the new state is final.

We denote χ as a set of states and A as a set of control actions. Then, reinforcement C_k is a consequence of the action U_k selected in the state X_k . The reinforcement signal is a function that depends on a vector defined in the space $\chi \times A$.

The control system selects actions in such a way as to minimize the total cost, which is determined as follows:

$$G_k = C_k + \gamma C_{k+1} + \gamma^2 C_{k+2} + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i C_{k+i},$$

$$0 \leq \gamma \leq 1.$$

The discount factor γ determines the importance of the predicted cost values during the selection of the control actions.

One of the key elements of the RL is the value function. Suppose that in each state X_k , the SC apply a control action according to a certain algorithm, which is called a policy π :

$$U_k = \pi(X_k),$$

then the value function determines the total cost that is paid by moving from the initial state X_k selecting control actions according to the policy π . This function can be represented as:

$$V^\pi(X_k) = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i C_{k+i}(X_{k+i}, U_{k+i}) =$$

$$= C_k(X_k, U_k) + \gamma V^\pi(X_{k+1}).$$

Reinforcement learning can be implemented using actor-critic architecture. In this case, the critic provides predictions of the value function for each state, and the actor maps the state vector to the control actions.

According to the methodology of deep RL, the actor and critic are implemented in the form of feed-forward multilayer neural networks, which approxi-

mate the control law and cost function, respectively: $V^\pi(X_k, \phi), \pi(X_k, \phi)$, where θ, ϕ are the vectors of critic and actor parameters, respectively.

There are many different RL algorithms. In this study, the Proximal policy optimization (PPO) algorithm is used [26]. This algorithm is implemented as follows:

1. To find the total cost of G_t , which is the sum of the cost for this time step and the discounted future cost [21]

$$G_t = \sum_{k=t}^{ts+m} \left(\gamma^{k-t} C_k \right) + b \gamma^{N-t+1} V(X_{ts+N}, \theta),$$

where b is 0 if X_{ts+N} is the final state and 1 otherwise. That is, if X_{ts+N} is not the final state, the discounted future value includes a function of the discounted state value calculated using the critic neural net V .

2. To find the advantage function D_t

$$D_t = G_t - V(X_t, \theta).$$

3. To update the critic parameters by minimizing the loss function L_{critic} for all received mini-batch data

$$L_{critic}(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (G_i - V(X_i, \theta))^2.$$

4. Update the actor parameters by minimizing the actor loss function L_{actor} of all received mini-batch data as follows

$$L_{actor}(\phi) =$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(-\min(r_i(\phi) \cdot D_i, c_i(\phi) \cdot D_i) + w \mathcal{H}_i(\theta, X_i) \right),$$

$$r_i(\phi) = \frac{\pi(U_i | X_i, \phi)}{\pi(U_i | X_i, \phi_{old})},$$

$$c_i(\phi) = \max(\min(r_i(\phi), 1 + \varepsilon), 1 - \varepsilon),$$

where D_i and G_i are the advantage and total cost function for the i -th element of the mini-batch, respectively; $\pi(U_i | X_i, \phi)$ is the probability of performing the action U_i in the state X_i , given the updated policy parameters ϕ ; $\pi(U_i | X_i, \phi_{old})$ is the probability of performing action U_i in state X_i , given the previous policy parameters ϕ_{old} before the current learning epoch; ε is the clip factor; $\mathcal{H}_i(\theta, X_i)$ is the loss entropy; w is the loss entropy weight.

The agent uses the following entropy value

$$\mathcal{H}_i(\theta, X_i) = -\sum_{k=1}^{PN} \pi(U_k | X_i, \phi) \ln \pi(U_k | X_i, \phi),$$

where PN is the number of possible discrete actions; $(U_i | X_i, \phi)$ is the probability of action U_i in state X_i according to the current policy.

We propose to use the following cost function:

$$C_k = Q^T X_k Q + L_k^T R^T U_k L_k R. \quad (9)$$

This function is similar to criterion (8), but the additional variable weight L_k allows us to optimize the control law more flexibly, for example, to encourage the agent to use wider pulses.

We studied four intellectual agents (IA), which use different input information as follows:

1) IA-1 receives an ordinary state vector X_k as an input, the dimensions of the input vectors for the in-plane and out-of-plane cases are $n_{in} = 4$ and $n_{out} = 2$, respectively;

2) In addition to the state vector X_k , IA-2 also receives information about the control action on the previous control step as follows

$$\left[X_k, u_{k-1} \right]^T, \quad n_{in} = 5, \quad \text{and} \quad n_{out} = 3;$$

3) In addition to the state vector X_k , IA-3 also receives information about the normalized number i of the TH pulses within the LQR sample period as follows

$$\left[X_k, \frac{i}{i_m} \right]^T, \quad n_{in} = 5, \quad \text{and} \quad n_{out} = 3;$$

4) IA-4 receives the following input information

$$\left[X_k, \frac{i}{i_m}, u_{k-1} \right]^T, \quad n_{in} = 6, \quad \text{and} \quad n_{out} = 4.$$

Table 1. Structure of neural networks

Layer	Number of neurons			
	actor		critic	
	in-plain	out-of-plain	in-plain	out-of-plain
Input	n_{in}	n_{out}	n_{in}	n_{out}
1-st hidden	$10n_{in}$	$10n_{out}$	$10n_{in}$	$10n_{out}$
2-st hidden	$\sqrt{900n_{in}}$	$\sqrt{300n_{out}}$	$\sqrt{100n_{in}}$	$\sqrt{100n_{out}}$
3-st hidden	90	30	10	10
Output	9	3	1	1

The agent can apply three control actions $[-u_f, 0, u_f]$ in each control channel, so the total number of possible different states of the actuators is $3^2 = 9$ for the in-plane case and $3^1 = 3$ for the out-of-plane case. These values specify the number of outputs of the categorical actors, which determine the relationship between the input vector and the corresponding state of the actuators.

For z-channel, the outputs of the actor directly specify the probability of the following actions $-u_f, 0, u_f$. For channels x and y , at first, the decimal integer number corresponding to the state of the actuators at the actor's output is converted to its ternary representation, and then, the control vector is determined as follows

$$U_{in} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = u_f \left(\begin{bmatrix} u_{xy}^1 \\ u_{xy}^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right),$$

where u_{xy}^1, u_{xy}^2 , are the first and second digits of the ternary representation of the actor's output, respectively.

Actors and critics of these agents are implemented in the form of NNs, the structure of which is shown in Table 1. Almost all NN layers use the Relu activation function. The only actor's output uses the Soft-Max activation function.

5. NUMERICAL RESULTS

The following system data were used for the training and studying the intelligent agent: $a = 7017$ km, $m^s = 500$ kg, $m^d = 1575$ kg, $T = 200$ sec, $T_f = 10$ sec, $U_f = 1.6$ N, $Q = 0.001 \times \text{diag}(0.01, 0.01, 0.01, 1, 1, 1)$, $R = 50 \times \text{diag}(1, 1, 1)$.

The state vector has the following maximum component values: $x_m = 800$ m, $y_m = 800$ m, $\dot{x}_m = 2$ m/s, $\dot{y}_m = 2$ m/s.

To speed up the learning process, all actors were pre-trained using supervised learning at the first stage on data obtained using DLQR with PWM.

The AI-1 and AI-2 are characterized by a significant steady error (Fig. 1, a). The AI-1 uses a large number of short pulses, and AI-2 uses a smaller number of long pulses (Fig. 1, c). The control accuracy of AI-3 and AI-4 is similar to that of the DLQR with PWM (Fig. 1, b, d), while it is assumed that the information about the control action on the previous control step as part of the input vector will make it

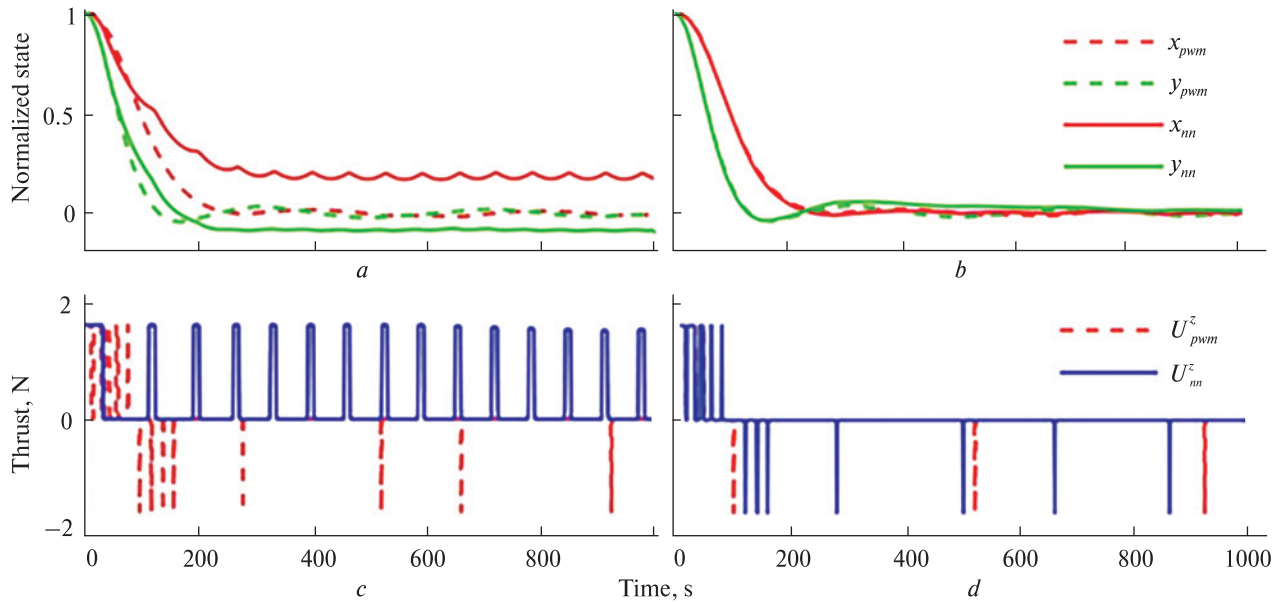


Figure 1. Normalized in-plane relative position for the supervise-trained agents (*a* – IA-2, *b* – IA-4) and TH thrust in *x*-direction for the supervise-trained agents (*c* – IA-2, *d* – IA-4)

Table 2. Performance metrics for AI-2 in case of RL with constant action weights

No	\tilde{L}	Number of TH firings	Mon	Total momentum, s	Error, 10^{-3}		
					<i>x</i>	<i>y</i>	mean
0	PWM	27	61.6	1664	19	19	19
1	0.0009	10	377.6	3776	120	60	90
2	0.0006	17	256.0	4352	62	39	50.5
3	0.0003	12	304.0	3648	88	35	61.5
4	0.00001	76	89.6	6816	18	14	16

possible to optimize the frequency of the TH firings using RL.

At the second stage the pre-trained agents were trained using RL with the following hyperparameters:

- experience horizon – 1500,
- clip factor $\varepsilon = 0.015$,
- loss entropy weight $w = 0.005$,
- mini batch size – 1024,
- discount factor $\gamma = 0.9994$.

The learning rates of the actor and critic were $1e-4$ and $5e-5$, respectively.

We used both constant weighting coefficients of actions $L_k^2 = \tilde{L}$ and variables ones formed as follows: $L_k^2 = \tilde{L}_1$ if $u_k \neq u_{k-1}$ and $L_k^2 = \tilde{L}_2$ if $u_k = u_{k-1}$.

Fig. 2 show the dependence of the normalized in-plane state vector and the TH thrust for AI-2 after being trained using RL with constant action weights. Performance metrics for these cases are presented in Table 2. In these cases, AI-2 exhibits similar behavior to the supervise-trained agent, namely a tendency to use too long control pulses. This, in most cases, does not allow AI-2 to outperform a PWM controller in terms of control accuracy. To estimate the agents' efficiency in terms of the TH firing, we use the ratio of the total momentum to the number of TH firings for the episode. This metric is denoted as Mon.

Fig. 3 show the variations of the normalized in-plane state vector and the TH thrust for AI-4 after being RL-trained with constant action weights. Per-

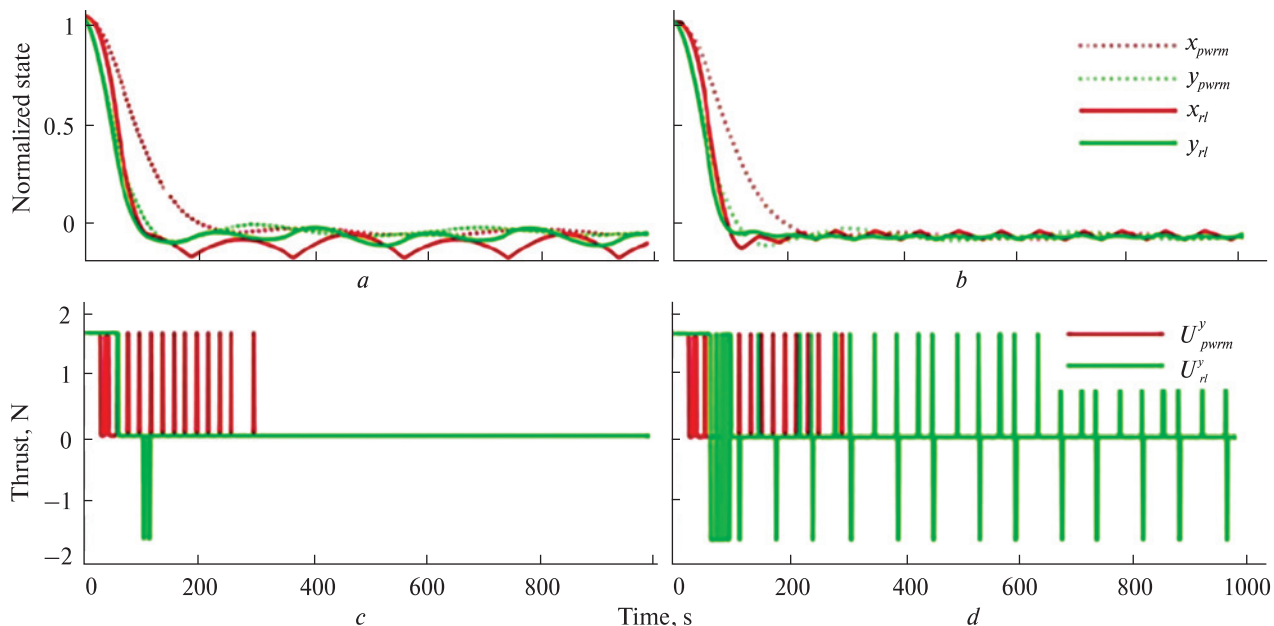


Figure 2. Normalized in-plane relative position for the RL-trained IA-2 (*a* – with $\tilde{L} = 0.0009$, *b* – with $\tilde{L} = 0.00001$) and TH thrust in *y*-direction for the RL-trained IA-2 (*c* – with $\tilde{L} = 0.0009$, *d* – with $\tilde{L} = 0.00001$)

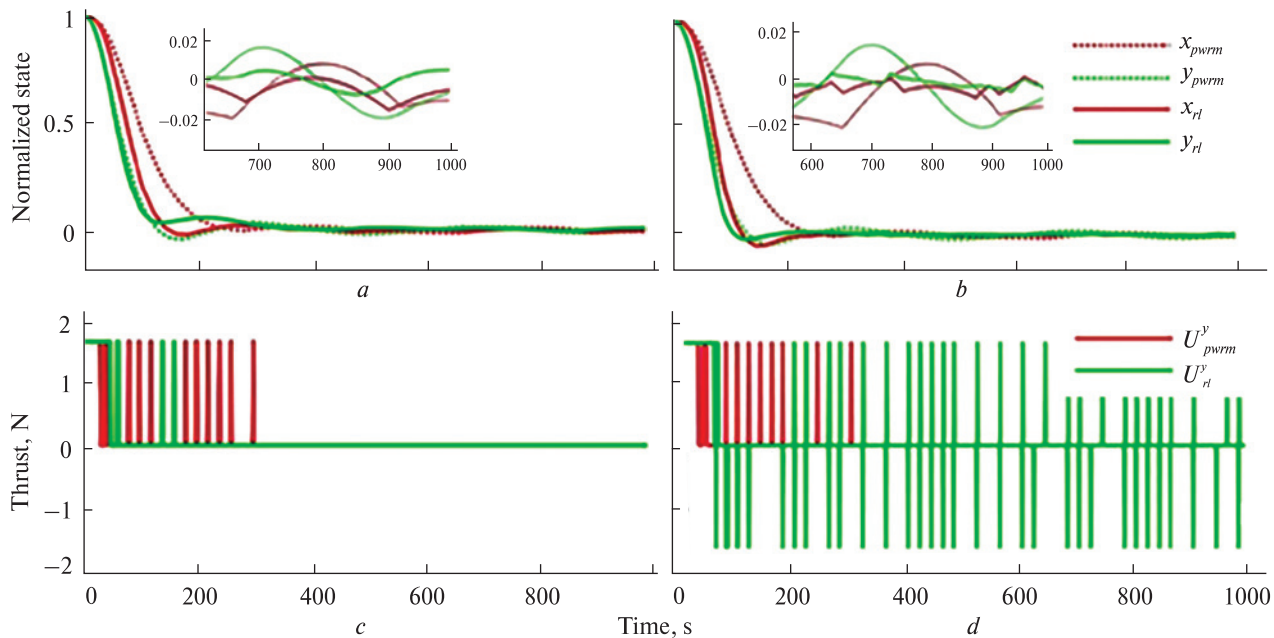


Figure 3. Normalized in-plane relative position for the RL-trained IA-4 (*a* – with $\tilde{L} = 0.0006$, *b* – with $\tilde{L} = 0.0001$) and TH thrust in *y*-direction for the RL-trained IA-4 (*c* – with $\tilde{L} = 0.0006$, *d* – with $\tilde{L} = 0.0001$)

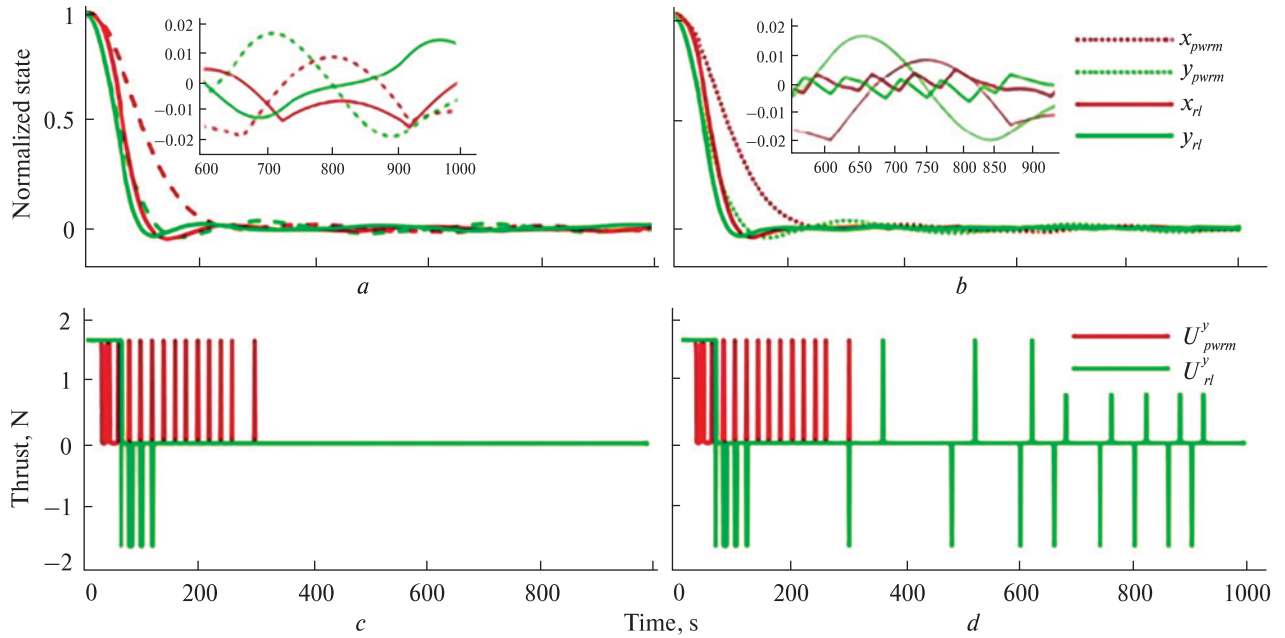


Figure 4. Normalized in-plane relative position for the RL-trained IA-4 ($a - \tilde{L}_1 = 0.0009, \tilde{L}_2 = 0$; $b - \tilde{L}_1 = 0.0001, \tilde{L}_2 = 0$) and TH thrust in y -direction for the RL-trained AI-4 ($c - \tilde{L}_1 = 0.0009, \tilde{L}_2 = 0$; $d - \tilde{L}_1 = 0.0001, \tilde{L}_2 = 0$)

Table 3. Performance metrics for AI-4 in case of RL with constant action weights

No	\tilde{L}	Number of TH firings	Mon	Total momentum, s	Error, 10^{-3}		
					x	y	mean
0	PWM	27	61.6	1664	19	19	19
1	0.0009	20	143.2	2864	17	19	18
2	0.0006	18	121.7	2192	15	7.6	11.3
3	0.0003	25	129.9	3248	13	12	12.5
4	0.0001	89	46.2	4112	6.7	4	5.35
5	0.00001	166	39.8	6608	9.8	2.5	6.15

Table 4. Performance metrics for AI-4 in case of RL with varying action weights

No	$\tilde{L}_1 / \tilde{L}_2$	Number of TH firings	Mon	Total momentum, s	Error, 10^{-3}		
					x	y	mean
0	PWM	27	61.6	1664	19	19	19
1	0.0009/0	17	186.3	3168	15	15	15
2	0.0006/0	21	155.4	3264	15	7.3	11.2
3	0.0003/0	18	183.1	3296	13	6.5	9.75
4	0.0001/0	53	73.3	3888	4.9	6.1	5.5
5	0.00001/0	134	42.0	5632	5.6	11	8.3

formance metrics for these cases are presented in Table 3. These cases demonstrate that adding to the state vector X_k additional information about the control action on the previous control step and the control cycle number allows the agent to outperform the PWM-based controller in terms of control accuracy and the number of TH firings.

Fig. 4 show the variation of the normalized in-plane state vector and the TH thrust for AI-4 after being trained by RL with variable action weights. In these cases, control actions are only penalized if a new TH firing happens. This feature of the cost function encourages the agent to limit the number of TH firings. Performance metrics for these cases are presented in Table 4. These cases demonstrate that the variable action weights allow the agent to improve control performance in terms of numbers of the TH firing.

Comparing all four AIs, we can conclude that additional input information about sample ordering allows the agent to improve control accuracy while the information about the control actions on the previous control step in conjunction with the cost function with time-varying weights makes the agent more efficient in terms of TH firings.

This section presents results only for in-plane control because this case is more complex than out-of-plane control. In the case of in-plane control, we deal with a coupled multi-input – multi-output system, but in out-of-plane case, we just have a single-input – single-output system. Moreover, RL-trained

agents for out-of-plane control demonstrate similar to the in-plane agents' behavior and performance.

CONCLUSION

The article studies the cases of the spacecraft relative on-off control when the resolution of the TH thrust does not allow a PWM to accurately approximate the linear control laws. For such cases, it is proposed to use RL to directly obtain policies of the TH firings for the spacecraft relative control.

A model of the relative motion of two satellites was built, which describes the control task in the form of a Markov decision process. For the RL-based training, a cost function with variable action weights is proposed, which allows the agent to optimize the number of TH firing in an explicit manner. To improve the control performance, it is proposed to extend the input state vector by the information about the control actions on the previous control step and the control cycle numbers.

Numerical results demonstrate that the reinforcement learning methodology can be used to design on-off relative controllers, which outperform conventional DLQR with PWM in terms of control accuracy, settling time, and numbers of the TH firings.

Acknowledgements. The authors thank the National Academy of Sciences of Ukraine, the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. D5000220031), and the Key Research and Development Program of Shaanxi of China (No. 2023-GHZD-32) for their support of this study.

REFERENCES

1. Alpatov A. P., Cichoeki F., Fokov A. A., Khoroshylov S. V., Merino M., Zakrzhevskii A. E. (2015). Algorithm for determination of force transmitted by plume of ion thruster to orbital object using photo camera. *66th Int. Astronautical Congress* (Jerusalem, Israel), 2239–2247.
2. Alpatov A., Khoroshylov S., Lapkhanov E. (2020). Synthesizing an algorithm to control the angular motion of spacecraft equipped with an aeromagnetic deorbiting system. *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, **5** (103), 37–46.
3. Anthony T., Wie B., Carroll S. (1989). Pulse-modulated control synthesis for a flexible spacecraft. *J. Guid., Contr., and Dyn.*, **13** (6), 1014–1022.
4. *Artificial intelligence: a modern approach* (2010). Eds. S. J. Russell, P. Norvig. Pearson education. Inc. ISBN-13: 978-0134610993.
5. Bernelli-Zazzera F., Mantegazza P., Nurzia V. (1998). Multi-pulse-width modulated control of linear systems. *J. Guid., Contr., and Dyn.*, **21** (1), 64–70.
6. *Deep Learning* (2016). Eds. I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. The MIT press. ISBN 978-0262035613.
7. Gaudet B., Linares R., Furfaro R. (2020). Adaptive guidance and integrated navigation with reinforcement meta-learning. *Acta astronaut.*, **169**, 180–190.

8. Gaudet B., Linares R., Furfaro R. (2020). Seeker based adaptive guidance via reinforcement meta-learning applied to asteroid close proximity operations. *Acta astronaut.*, **171**, 1–13.
9. Golubek A. V., Dron M. M., Petrenko O. M. (2023). Estimation of the possibility of using electric propulsion systems for large-sized orbital debris post-mission disposal. *Space Science and Technology*, **29** (3), 34–46. DOI: 10.15407/knit2023.03.034
10. Hovell K., Ulrich S. (2020). On deep reinforcement learning for spacecraft guidance. AIAA SciTech Forum, 6–10 January 2020, Orlando, FL. DOI: 10.2514/6.2020-1600.
11. Ieko T., Ochi Y., Kanai K. (1997). A new digital redesign method for pulse-width modulation control systems. *AIAA proc. AIAA-97*, 3700.
12. Izzo D., Märten S., Pan B. (2019). A survey on artificial intelligence trends in spacecraft guidance dynamics and control. *Astrodyn.*, **3**, 287–299. DOI: 10.1007/s42064-018-0053-6.
13. Khoroshylov S. V. (2018). Relative motion control system of spacecraft for contactless space debris removal. *Nauka innov.*, **14** (4), 5–16.
14. Khoroshylov S. V., Redka M. O. (2019). Relative control of an underactuated spacecraft using reinforcement learning. *Techn. Mechanics*, **4**, 43–54.
15. Khoroshylov S. V., Redka M. O. (2021). Deep learning for space guidance, navigation, and control. *Space Science and Technology*, **27** (6), 38–52.
16. Khosravi A., Sarhadi P. (2016). Tuning of pulse-width pulse-frequency modulator using PSO: An engineering approach to spacecraft attitude controller design. *Automatika*, No 57, 212–220.
17. Lapkhanov E., Khoroshylov S. (2019). Development of the aeromagnetic space debris deorbiting system. *Eastern-European J. Enterprise Technologies*, **5** (101), 30–37.
18. Lewis F. L., Vrabie D., Syrmos V. L. (2012). *Optimal Control* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
19. Li W., Cheng D., Liu X., et al. (2019). On-orbit service (OOS) of spacecraft: A review of engineering developments. *Progress in Aerospace Sci.*, **108**, 32–120.
20. *Machine Learning* (1997). Ed. T. Mitchell. New York: McGraw Hill. ISBN 0070428077.
21. Mnih V., Badia A., Mirza M., Graves A., Lillicrap T., Harley T., Silver D. (2016). Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learning. *arXiv preprint, ArXiv:1602.01783*.
22. Oestreich C. E., Linares R., Gondhalekar R. (2021). Autonomous six-degree-of-freedom spacecraft docking maneuvers via reinforcement learning. *J. Aerospace Inform. Syst.*, **18**(7). DOI: 10.2514/1.I010914.
23. Redka M. O., Khoroshylov S. V. (2022). Determination of the force impact of an ion thruster plume on an orbital object via deep learning. *Space Science and Technology*, **28**(5), 15–26.
24. *Reinforcement learning: an introduction* (1998). Eds. R. S. Sutton, A. G. Barto. MIT press. ISBN 978-0262193986.
25. Robinett R. D., Parker G. G., Schaub H., Junkins J. (1997). Lyapunov optimal saturated control for nonlinear systems. *J. Guid., Contr., and Dyn.*, **20** (6), 1083–1088.
26. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. (2017). Proximal policy optimization algorithms. *arXiv preprint, arXiv:1707.06347*.
27. Silver D., Schrittwieser J., Simonyan K. (2017). Mastering the game of Go without human knowledge. *Nature*, **550**, 354–359. DOI: 10.1038/nature24270.
28. Song G., Buck N. V., Agrawal B. N. (1999). Spacecraft vibration reduction using pulse-width pulse-frequency modulated input shaper. *J. Guid., Contr., and Dyn.*, **22** (6), 433–440.
29. Yamanaka K., Ankersen F. (2002). New State Transition Matrix for Relative Motion on an Arbitrary Elliptical Orbit. *J. Guid., Contr., and Dyn.*, **25** (1), 60–66.

Стаття надійшла до редакції 18.12.2023

Після доопрацювання 18.01.2024

Прийнято до друку 30.01.2024

Received 18.12.2023

Revised 18.01.2024

Accepted 30.01.2024

С. В. Хорошилов¹, пров. наук. співроб., д-р техн. наук, проф.

ORCID.org/0000-0001-7648-4791

E-mail: skh@ukr.net,

Ч. Ван², проф., PhD

ORCID.org/0000-0002-3789-8614

¹ Інститут технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
вул. Лешко-Попеля 15, Дніпро, Україна, 49005

² Північно-Західний політехнічний університет

Сіань Шаньсі, 710072, Китай

РЕЛЕЙНЕ КЕРУВАННЯ ВІДНОСНИМ РУХОМ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ

Розглядається задача керування відносним рухом космічних апаратів за допомогою реактивних установок, вихід яких має два стани: «увімкнено» та «вимкнено». Для випадків, коли роздільна здатність реактивних двигунів не забезпечує якісну апроксимацію лінійних законів керування з використанням широтно-імпульсного модулятора тяги, досліджено можливість застосування навчання з підкріпленням для прямого пошуку законів керування, що встановлюють зв'язок між вектором стану і командами вмикання-вимикання реактивних двигунів. Для реалізації такого підходу отримано модель керованого відносного руху двох супутників у формі марківського процесу прийняття рішень. Інтелектуальний агент представлено у вигляді нейромережевого «виконавця» та «критика» та визначено архітектури цих модулів. Запропоновано використовувати функцію вартості зі змінними ваговими коефіцієнтами керівних впливів, що дозволяє оптимізувати кількість увімкнень реактивних двигунів явним чином. Для підвищення якості керування запропоновано використовувати розширений вектор входу для нейромережевого виконавця та критика інтелектуального агента, який крім вектора стану ще містить інформацію про керівну дію на попередньому такті керування та номер такту керування. Для зменшення часу навчання використано попереднє навчання агента на даних, отриманих за допомогою традиційних алгоритмів керування. Чисельні результати демонструють, що використання методології навчання з підкріпленням дозволяє перевершити результати, що забезпечуються лінійним контролером із широтно-імпульсним модулятором, з точки зору точності керування, швидкодії та кількості включень реактивних двигунів.

Ключові слова: релейне керування, навчання з підкріпленням, відносне керування космічним апаратом, виконавець, критик, нейронна мережа, включення реактивного двигуна.

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.015>
UDC 621.45

O. ABADA, Professor
E-mail: abadaomar@ymail.com

H. KBAB, Professor
E-mail : k71hakim@gmail.com

S. HAIF, Doctoral degree
ORCID 0000-0002-9810-761X
E-mail : haif.sidali@etu.univ-blida.dz

Aeronautical Sciences Laboratory (LSA)
Aeronautics and Space Studies Institute
Blida 1 University BP270 Soumaa street, Blida, Algeria

OPTIMIZING THE DESIGN OF A SUPERSONIC PLANAR DUAL BELL NOZZLE

Dual bell nozzles present a promising solution for maximizing propulsion efficiency at high altitudes, while also mitigating dangerous side loads at lower altitudes. Such nozzles are comprised of two distinct contours, with the first optimized for low altitude operation, and the second tailored for high altitude conditions. These contours are interconnected at an inflexion point. The present study focuses on optimizing the contour design of a planar dual bell nozzle. Leveraging the commercial ANSYS-Fluent software, we conducted an investigation into the influence of the inflection angle on the transition between the two operating modes, examined the flow behavior inside the nozzle, and assessed the impact of the inflection angle on the thrust coefficient.

Keywords: dual bell nozzles, the inflection angle, optimization.

1. INTRODUCTION

When it comes to supersonic nozzles and altitude, there are indeed adaptation issues related to changes in atmospheric pressure at different altitudes. Nozzles are devices designed to optimize the efficiency of jet engines by converting the energy of gases into propulsion. Supersonic jet engines typically use convergent-divergent nozzles, also known as De Laval nozzles, to achieve supersonic exhaust velocities [2].

At low altitudes, where atmospheric pressure is high, convergent-divergent nozzles work well in ac-

celerating the exhaust gases to supersonic speeds [8]. However, as altitude increases, atmospheric pressure decreases, which can lead to adaptation problems.

At high altitudes, the low atmospheric pressure reduces the confinement pressure inside the nozzle, which can result in excessive expansion of the exhaust gases. This can cause efficiency losses and a decrease in thrust. The excessive expansion can also lead to operational instabilities, such as nozzle flow separation, where the gas flows are no longer attached to the internal walls of the nozzle, resulting in thrust loss and propulsion instability [3, 11].

Цитування: Abada O., Kbab H., Haif S. Optimizing the Design of a Supersonic Planar Dual Bell Nozzle. *Space Science and Technology*. 2024. **30**, № 2 (147). P. 15–27. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.015>

© Publisher PH «Akademperiodyka» of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

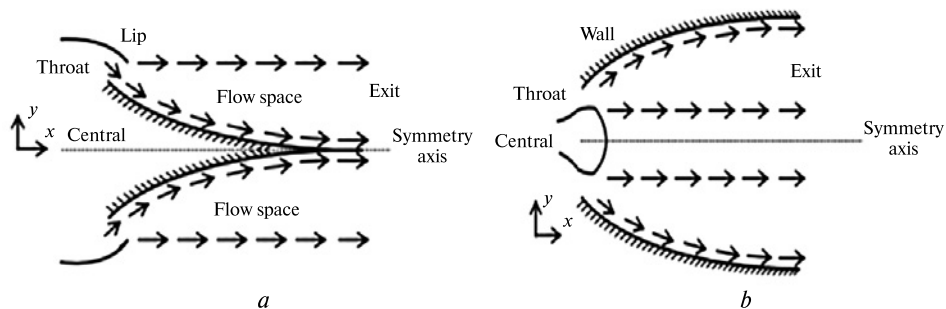


Figure 1. Nozzle geometry: a — plug nozzle, b — E-D nozzle

To overcome these adaptation issues, some supersonic nozzles are designed with variable geometry adjustment systems, such as variable geometry nozzles [4].

The dual bell nozzle is one such design that utilizes nozzle wall inflection to achieve altitude adaptation. At low altitudes, the dual bell nozzle achieves a controlled and symmetrical separation of flow at the wall inflection, resulting in a less effective expansion ratio. As the altitude increases, the flow remains attached to the nozzle wall until the full geometrical expansion ratio is utilized. This design allows for better performance and efficiency across different altitudes, addressing the challenges faced by fixed geometry nozzles. In 1949, Cowles and Foster first introduced the concept of a dual bell nozzle, and the design was patented by Rocketdyne in the 1960s [1, 6, 10]. Many researchers have been interested in the study of these nozzles. These studies have focused on contour design [5, 16]. Among these studies, there are experimental studies [17, 18] and numerical studies [7, 13].

Another type of nozzle that addresses altitude compensation is the expansion-deflection (E-D) nozzle. This nozzle achieves altitude compensation through the interaction of exhaust gas with the surrounding atmosphere [15]. The E-D nozzle controls its area ratio based on the ambient pressure, allowing it to achieve altitude compensation up to the design pressure [14]. This feature ensures that the nozzle performs optimally across different altitudes by adjusting the expansion area according to the surrounding atmospheric conditions, enhancing overall rocket performance and efficiency.

In summary, the problem of adapting supersonic nozzles with altitude lies in the need to optimize the

nozzle geometry to maintain efficient and stable performance at different altitudes. Jet engine designers are working on solutions such as variable geometry nozzles to overcome these challenges.

The present study focuses on optimizing the contour design of a planar dual bell nozzle (PDBN). Leveraging the commercial ANSYS-Fluent software, we conducted an investigation into the influence of the inflection angle on the transition between the two operating modes, examined the flow behavior inside the nozzle, and assessed the impact of the thrust coefficient (C_f).

2. METHODOLOGY

This section aims to describe the method employed in designing the PDBN, which is carried out in two parts.

1. Design of the first contour. The first divergent is a contour of an E-D supersonic nozzle that gives uniform parallel flow at the exit. For the design of the first nozzle profile, we have developed a program in FORTRAN. This program is inspired by the program that designs the contour of the Plug nozzle [19] with changes in parameters and principle (see Fig. 1). The design method is based on the function of Prandtl Meyer.

$$\nu(M) = \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \left[\frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M^2-1) \right]^{\frac{1}{2}} - \tan^{-1} (M^2-1)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

The number of Mach $M=1.00$ at the throat and it accelerates to the Mach number M_E at the exit section. ν is the angle between the velocity vector of the

throat and the x-axis. The lines shown in Fig. 2 represent the Mach waves, they are inclined with angle u (Angle of Mach), and the flow properties are constant along each line of Mach exits from point A.

Between the line AB and AE, there is an infinity of Mach waves, exit of point A, centered. Each line gives a Mach number, from these lines which we can easily deduct a point on the wall (the flow properties are constant along each line of Mach). As the gas is perfect, the velocity vector is tangent with a stream line, which will be regarded as the contour of Plug wall to require (The main idea of this method). To have a Mach number required at the exit, the flow to the throat must be tilted at an angle θ_B (Flow deviation compared to the horizontal).

$$\theta_B = v(M_E). \quad (2)$$

Figure 3 presents the parameters of an intermediate Mach line connecting the point A and point i . The determination of wall points is made explicitly.

The lines are iso-Mach curves, so the number of Mach in the center of expansion A equals also the number of Mach on the wall. The number of Mach in point i is given by:

$$M_i = 1 + (i-1) \left[\frac{(M_E - 1)}{(N - 1)} \right] \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N), \quad (3)$$

where N is the selected point number.

Once the number of Mach M_i in point i is known. In this case we can write:

$$u_i = \sin^{-1} \left(\frac{1}{M_i} \right), \quad (4)$$

$$v_i = v(M_i), \quad (5)$$

$$\theta_i = \varphi_i - u_i. \quad (6)$$

And for the point $i+1$ we have:

$$\frac{x_{i+1}}{\lambda_B} = \left(\frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_B} \right) \cos \varphi_{i+1}, \quad (7)$$

$$\frac{y_{i+1}}{\lambda_B} = \left(\frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_B} \right) \sin \varphi_{i+1}, \quad (8)$$

λ is the polar ray of a Mach wave with:

$$\frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_B} = \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_B} \right) \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (9)$$

$$\alpha = \pi - \varphi_i + v_E - v_i, \quad (10)$$

$$\beta = \varphi_{i+1} - v_E + v_i, \quad (11)$$

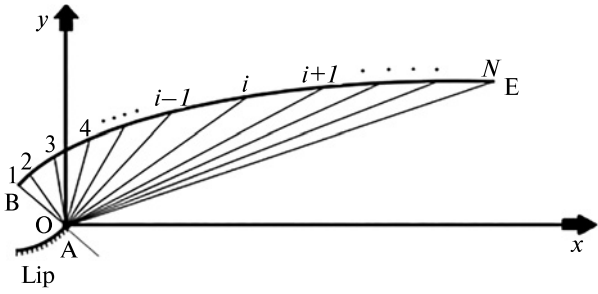


Figure 2. Discretization of the expansion zone

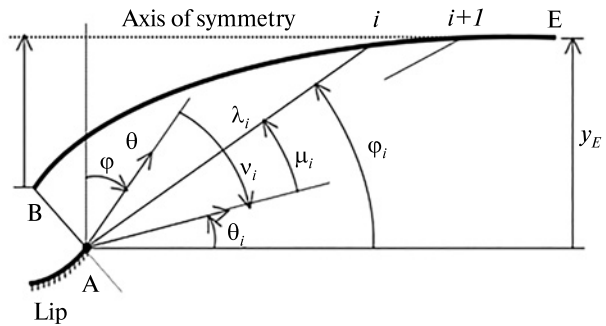


Figure 3. Parameters of an intermediate Mach

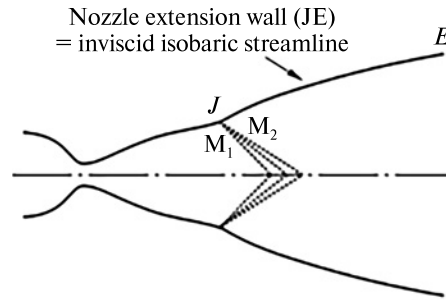


Figure 4. Centered expansion at junction J [12]

α and β (angles respectively at tops A and i of the triangle connecting the points A, i and $i+1$ of the Fig. 3). φ is the polar angle of Mach.

2. Design of the second contour. The contour of the nozzle extension (second bell) is designed to give a constant wall Mach number M_2 . This is done by applying the characteristics method to the Prandtl-Meyer expansion around junction point J with equal intensity M_2/M_1 (see Fig. 4) for the inviscid fluid hypothesis.

3. INVISCID CALCULATIONS

In this study, we performed inviscid calculations to analyze the flow through the nozzle. The simulation aims to study the flow in a specific nozzle, shown in Figure 5, *a*. This figure illustrates the profile of the type E-D nozzle, with a radius of 0.6 cm and an exit area of 0.0218 m². The geometry of the nozzle was produced using our computer code developed in FORTRAN. Y^* represent throat radius. Figure 5, *b* represent the evolution of the Mach number along

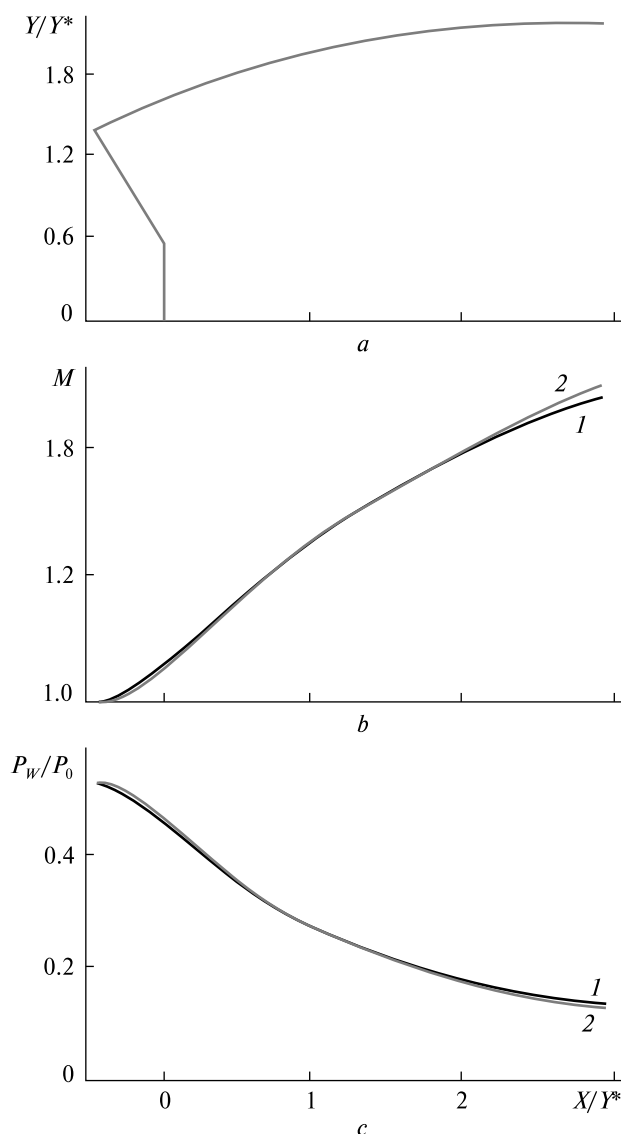


Figure 5. Profile of the E-D nozzle for Mach = 2.00 (*a*), wall Mach number evolution (*b*), wall pressure ratio evolution (*c*): 1 – ANSYS-fluent, 2 – FORTRAN

the wall of the E-D nozzle. It is noted that the flow increases from $M = 1.0$ in the col until $M =$ design Mach. Figure 5, *c* show the wall pressure ratio comparison between the numerical method (FORTRAN) and the simulation (ANSYS-Fluent). The results show a good similarity.

Figure 6, *a* shows the Iso-Mach contours for an E-D nozzle that works in the design Mach number obtained by our simulation. We note that in the divergent part, the number of Mach increases until reaching the value of the nozzle designing Mach number at the exit. We notice that the number of Mach at the exit of E-D nozzle is $M = 1.9$. Figure 6, *b* shows the Iso-pressure ratio contours for an E-D nozzle that works in the design Mach number obtained by our simulation. The figure shows the Prandtl – Meyer expansion fan around the lip. In addition, there are no pressure fluctuations or turbulence corresponding to a typical flow along the nozzle.

4. VISCOUS CALCULATIONS

In this part, a numerical analysis is performed on the flow through E-D nozzle. Flow analysis is performed. Numerical analysis is performed on 2D planar models using the commercial ANSYS-Fluent software. The $k-\omega$ SST model was used as the turbulence model. The baseline solver was selected as a double-precision density-based coupled solver with Implicit Time Integration. Least-square cell-based gradient is used for spatial discretization in which the solution was assumed to vary linearly was used and a second-order upwind scheme was used for interpolating the values of pressure, momentum, turbulent kinetic energy, specific dissipation rate and energy. The computational analysis was conducted under steady conditions. The initialization for steady-state problem was done using full multigrid (FMG) initialization to get the initial solution, and the inlet boundary was provided to give the reference value. Sutherland equation is used for calculating the viscosity of air. Figure 7 represent the evolution of the Iso-Mach of the E-D nozzle for different nozzle pressure ratio (NPR = 10, 36.7 and 50). For NPR = 10 (overexpansion), it is noted that the flow remains attached to the walls of the E-D nozzle.

To study the interaction of the flow of the E-D nozzle with the ambient outside, we made a com-

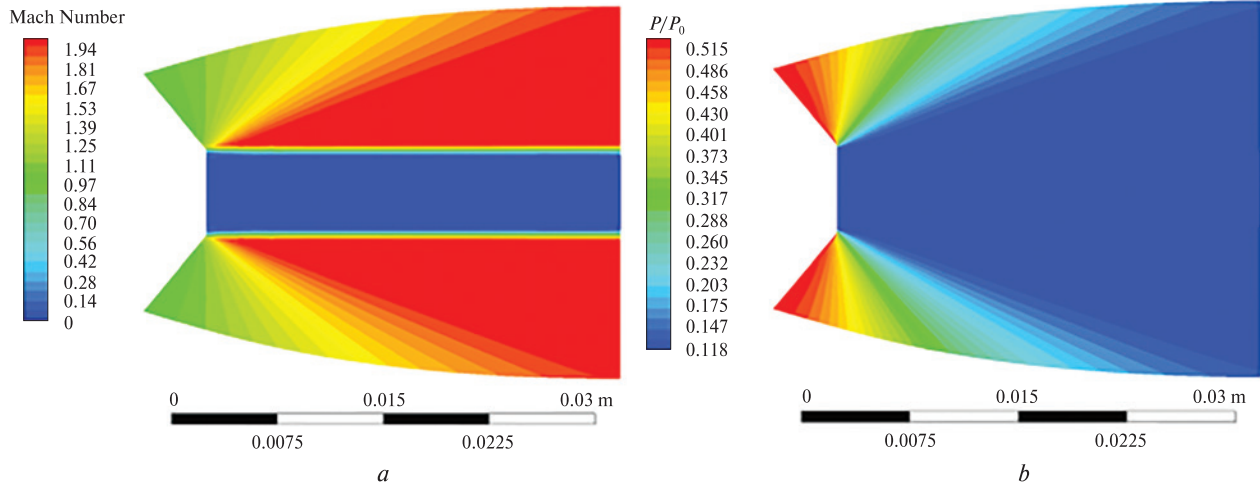


Figure 6. Iso-Mach contours (a) and iso-pressure ratio contours (b)

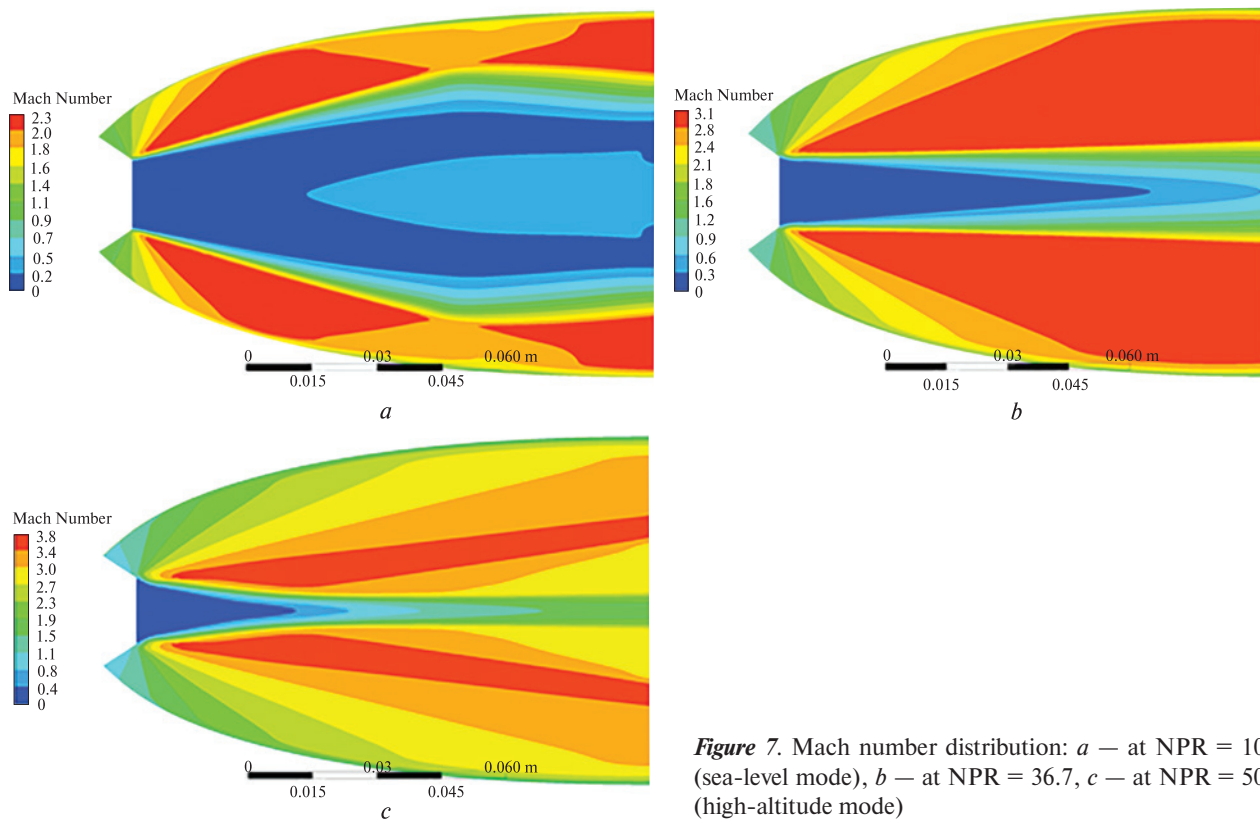


Figure 7. Mach number distribution: a — at NPR = 10 (sea-level mode), b — at NPR = 36.7, c — at NPR = 50 (high-altitude mode)

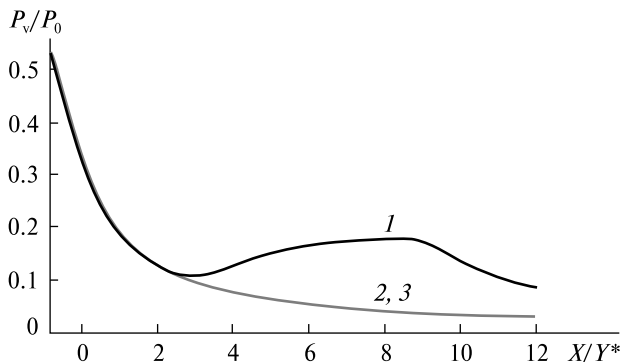


Figure 8. Wall pressure ratio distribution for different values of NPR (1, 2, 3 – at NPR = 10, 36.7, 50 respectively)

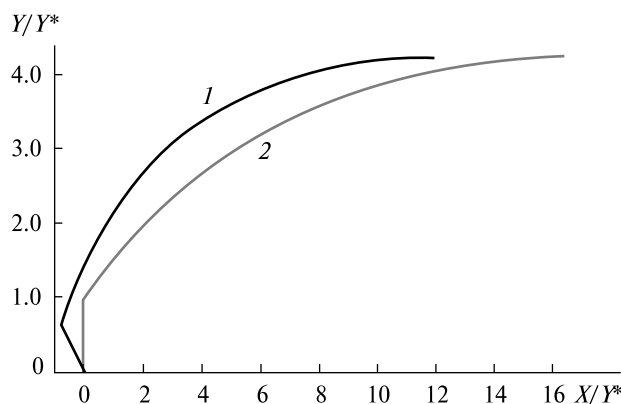


Figure 9. E-D (1) and CN (2) nozzle profile

Table 1. Boundary conditions values

Parameter	E-D and CN
Total pressure, Pa	200000
Static pressure, Pa	105656
Ambient pressure, Pa	26666.66 and 5000
Design Mach Number	3.0

Table 2. Thrust of the two nozzles (CN and E-D)

NPR	CN	E-D	Thrust gain (%)
07.0	1779.502	1995.667	10.83
40.0	2871.406	2879.632	00.29

parison of the pressure of the wall for different modes of operation (NPR). Figure 8 represents the pressure distribution on the walls of the nozzle for different pressure ratio (NPR = 10, 36.7 and 50). For NPR = 36.7 and 50 we notice that the pressure on the walls is not affected by the external environment. The main property of an E-D nozzle is its interaction with the outside environment allowing it to eliminate flow separation.

5. COMPARISON BETWEEN E-D AND CN

A flow analysis is conducted on the E-D nozzle using numerical methods. To validate the performance of this nozzle, we compare it with a conventional nozzle (CN) under similar boundary conditions (Table 1). The contour of the conventional nozzle is generated by the method of characteristic [9]. The study involves 2D planar models analyzed using the ANSYS-Fluent software, and the simulation employs the Fluent solver to solve the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with a $k-\omega$ SST turbulence model.

After comparing the profiles of the E-D nozzle and CN (shown in Fig. 9), it is observed that the length of the E-D nozzle is 11.97717 units, while the length of the CN is 4.2293 units, both having the same section ratio $A_e / A_t = 4.234$. This indicates a decrease in length of 27.12 % for the E-D nozzle compared to the CN. Consequently, the E-D nozzle offers a more streamlined design, leading to greater fuel savings for the E-D. In this context, A_t and A_e represent the throat area and exit area of the nozzle, respectively.

Figure 10 represent the evolution of the Iso-Mach of the E-D nozzle and CN for NPR = 7.5 and 40.0. For NPR = 7.5 (overexpansion), it is noted that the flow remains attached to the walls of the E-D nozzle, unlike the conventional nozzle in which there is a separation of the flow in the walls. This leads to the appearance of the side loads, which in turn reduces the efficiency of the nozzle.

The E-D's nozzle operates without the need for controlled flow separation mechanisms, enabling it to adapt to different altitudes. In the open wake mode (Fig. 10, a), the nozzle's exit region is regulated by the ambient pressure, which results in the exhaust gas not completely filling the nozzle. However, in the closed wake mode (Fig. 10, c), the entire exit area of the nozzle is filled by the exhaust gases. The transition

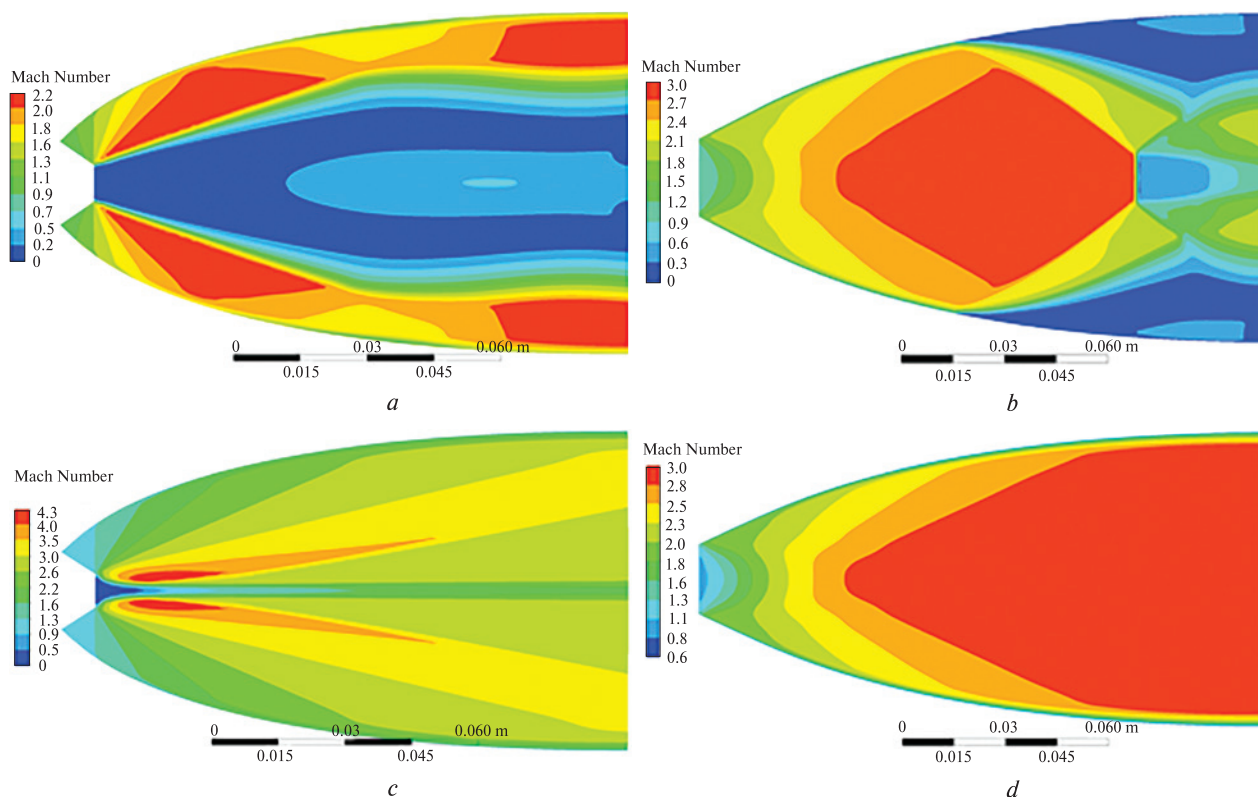


Figure 10. Iso-Mach E-D nozzle for NPR = 7.5 (a), iso-Mach CN nozzle for NPR = 7.5 (b), iso-Mach E-D nozzle for NPR = 40 (c), iso-Mach C nozzle for NPR = 40 (d)

from the open to closed wake modes occurs at a specific ambient pressure known as the design pressure. If the ambient pressure is further decreased beyond this design pressure, the remaining expansion would occur outside the nozzle, resembling the behavior of a bell nozzle. In such a scenario, the altitude compensation benefits of the E-D's nozzle would not be applicable.

The note highlights the thrust characteristics of the E-D nozzle compared to the conventional nozzle at different pressure ratios (Table 2). When NPR is equal to 7.5, the E-D nozzle demonstrates a considerable increase in thrust compared to the conventional nozzle. At NPR 40, both the E-D nozzle and the conventional nozzle exhibit nearly equal thrust performance. This similarity in thrust is attributed to the fact that both nozzles have the same effective section. The advantage of the E-D nozzle over the conventional nozzle lies in its ability to generate higher thrust at lower pressure ratios than the design pres-

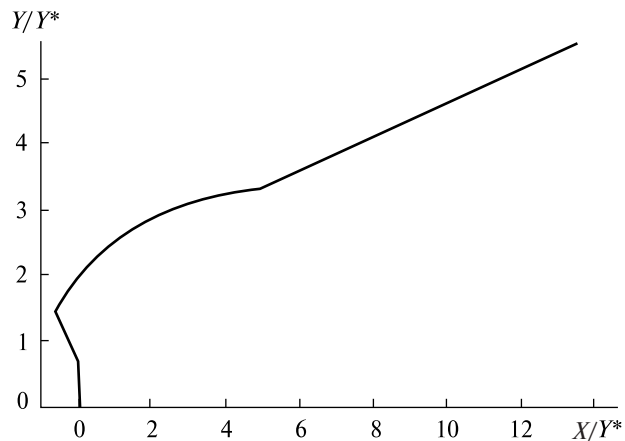


Figure 11. Planar dual bell nozzle profile

sure ratio. However, as the pressure ratio approaches and exceeds the design pressure ratio, the thrust advantage diminishes, eventually leading to comparable performance between the two nozzles.

6. PLANAR DUAL BELL NOZZLE (PDBN)

Figure 11 represents the PDBN profile obtained by our FORTRAN program. The junction point coordinates J (where the two profiles meet) are given by $X_J = 13.48$ and $Y_J = 3.31$. The total nozzle length is $L_T = 13.48$. The exit radius of the nozzle is $R_T = 5.55$.

A series of computations were initiated to investigate how the variation in nozzle pressure ratios (NPR) affects the dual bell nozzle operating mode, with particular attention to the fluid behavior near the nozzle wall. The simulations considered the NPR being linearly increased from 05.0 to 100. To accurately replicate the physics of the studied problem, the total

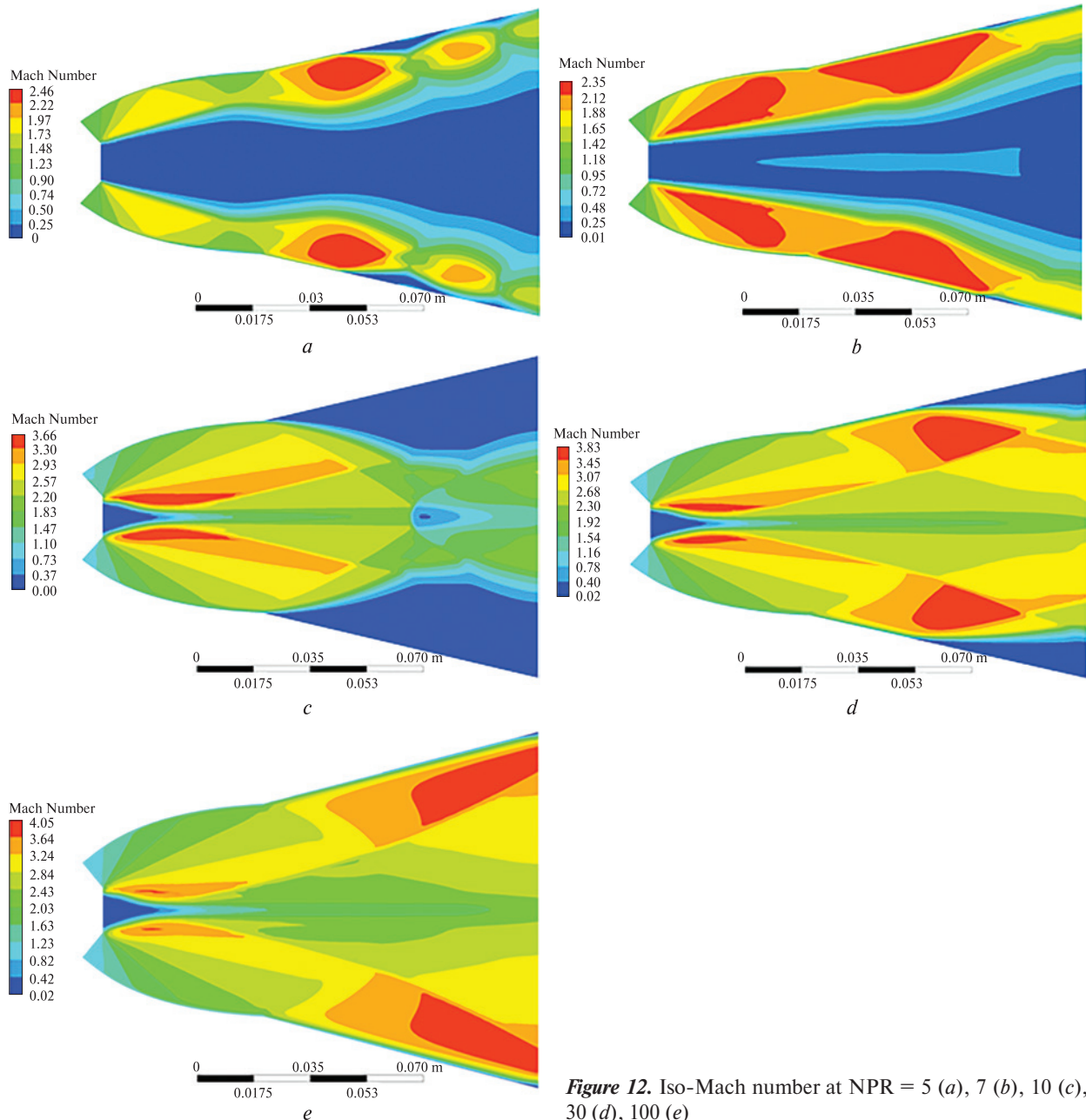


Figure 12. Iso-Mach number at NPR = 5 (a), 7 (b), 10 (c), 30 (d), 100 (e)

feeding pressure was maintained at a constant level, while the ambient pressure was deliberately altered. These simulations allowed us to highlight all operating modes of this nozzle while passing from sea level Mode (Fig. 12, *a*), transition Mode (Fig. 12, *d*) until the high altitude Mode (Fig. 12, *e*). The wall pressure variation according to NPR is shown in Figures 13.

For $NPR = 5$ and 7 the PDBN operates in the open wake mode. The flow in the second contour remains close to the wall of the nozzle, this explains the fluctuation in wall pressure ratio (curves in red and black from Fig. 13). For $NPR = 10$ a brutal increase in wall pressure after the inflection point. It can be seen that the separation point remains stable at the inflection point of the nozzle. This reduces the side load in low altitude mode. In the case of NPR between 10 and 90 , it is noted that the separation point ramps along the extension wall of the nozzle. Consequently, the nozzle operates during this phase in transition mode. We note that for $NPR = 100$, the nozzle operates in high altitude mode.

In order to study the effect of geometric variables on the PDBN, and in particular on the behavior of the flow inside it, we have studied the effect of the inflection angle α (Fig. 14, *a*). Two PDBN with different inflection angle (21° and 7°) have been considered for this study. In addition to the previous PDBN ($\alpha = 14^\circ$). The inflection angle of the PDBN is varied, keeping the exit section constant. In the study of nozzle performance at various NPR (Nozzle Pressure Ratios), three different PDBN configurations, namely $\alpha = 7^\circ$, $\alpha = 14^\circ$, and $\alpha = 21^\circ$, were analyzed. The schematic diagram of 3 nozzles are provided in Fig. 14, *b*.

For $NPR = 5$, the PDBN with $\alpha = 7^\circ$ and $\alpha = 21^\circ$ both operated in the open wake mode, similar to the PDBN with $\alpha = 14^\circ$. However, a notable contrast arose with PDBN ($\alpha = 21^\circ$), where flow separation occurred precisely at the inflection point, as depicted in Fig. 15, *a*. Upon reaching $NPR = 7$, the PDBN featuring $\alpha = 7^\circ$ operated differently, utilizing a closed wake mode. In contrast, both PDBN with $\alpha = 14^\circ$ and $\alpha = 21^\circ$ remained in an open wake mode. Advancing to $NPR = 10$, both PDBN ($\alpha = 7^\circ$ and $\alpha = 21^\circ$) operated in a closed wake mode, demonstrating their similarity in performance at this NPR. However, a significant difference became apparent at

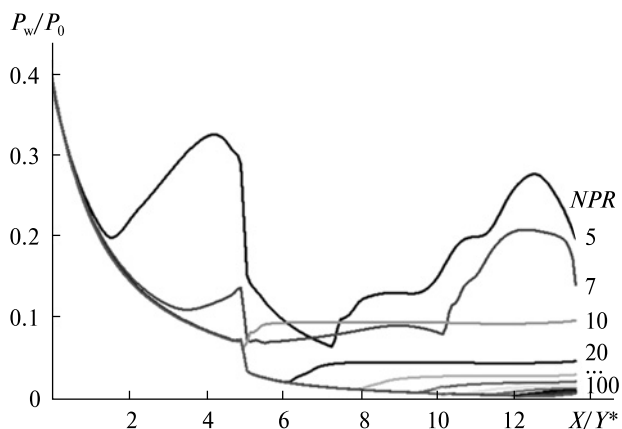


Figure 13. Wall pressure ratio distribution for different values of NPR

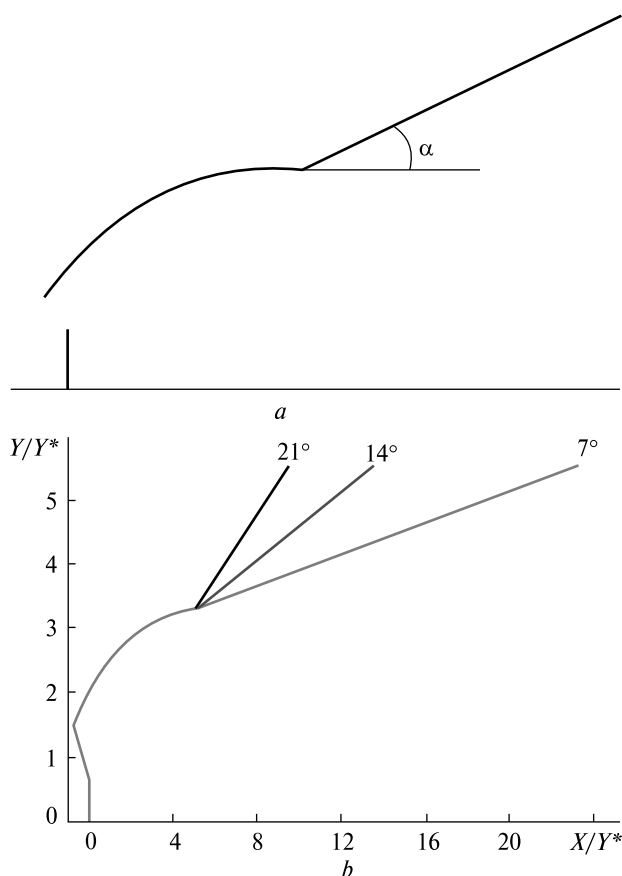


Figure 14. Schematic diagram of nozzle contour (*a*) and configuration of the 3 nozzles (*b*)

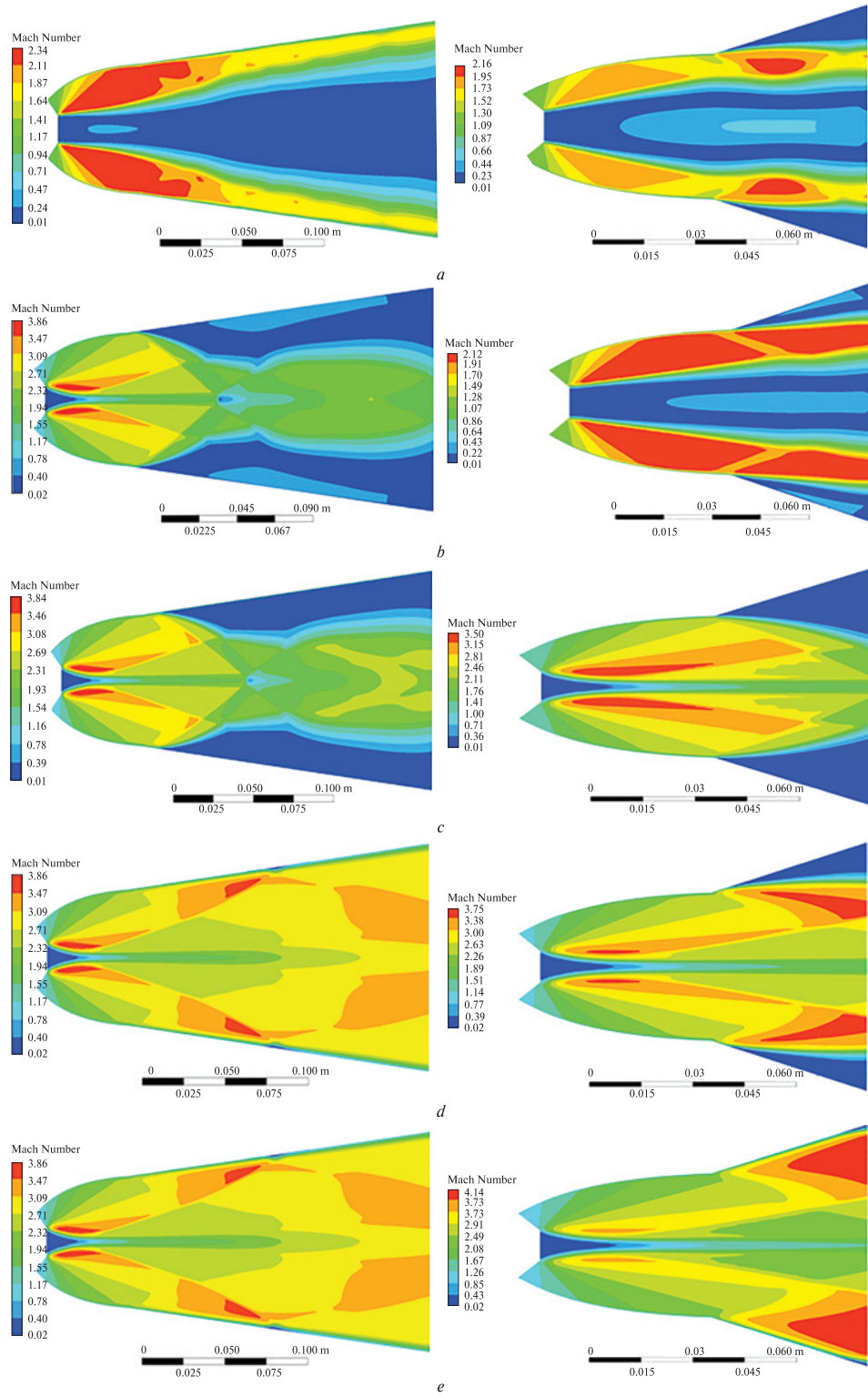


Figure 15. Iso-Mach number for $\alpha = 7^\circ$ (left) and $\alpha = 21^\circ$ (right) at NPR = 5 (a), 7 (b), 10 (c), 30 (d), 100 (e)

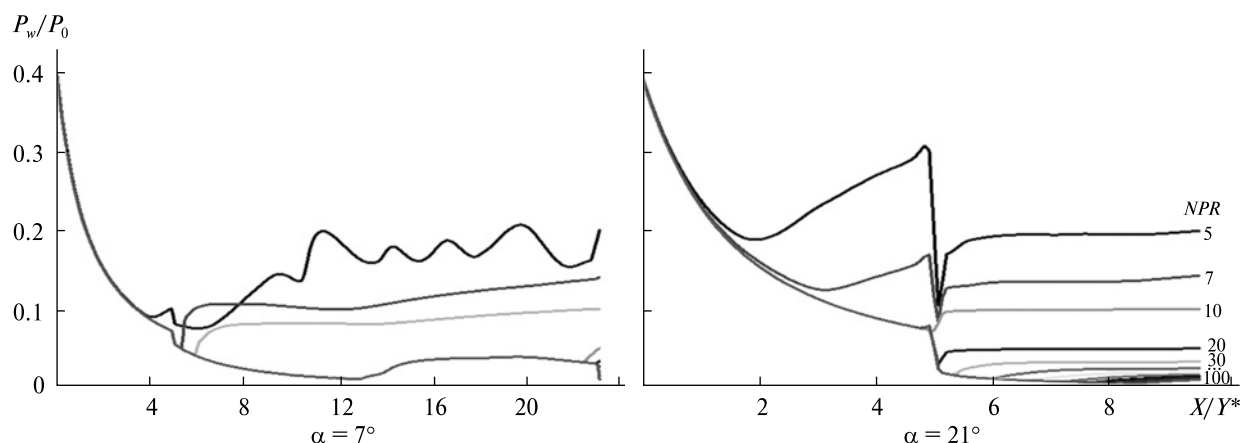


Figure 16. Wall pressure ratio distribution for different values of NPR (NPR = 5, 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100)

NPR = 30. While flow separation was completely eliminated in the PDBN with $\alpha = 7^\circ$, the PDBN with $\alpha = 21^\circ$ still experienced some separation, particularly near the inflection point. This intriguing observation occurred despite both nozzles operating at the same altitude (NPR). Finally, when reaching NPR = 100, it was found that both PDBN configurations, $\alpha = 7^\circ$ and $\alpha = 21^\circ$, achieved complete elimination of flow separation, signifying their enhanced performance at higher NPR values. These findings indicate that the behavior of PDBN configurations is influenced by NPR, with certain configurations exhibiting improved flow characteristics and reduced separation at specific NPR values.

Figure 16 show Wall pressure ratio changes for different NPRs for PDBN ($\alpha = 7^\circ$) and PDBN ($\alpha = 21^\circ$), respectively.

To investigate the impact of the inflection angle on the thrust coefficient (C_f), Fig. 17 illustrates the relationship between the two parameters for different nozzle pressure ratios (NPR). During the launch phase of the space rocket, the nozzle with a deflection angle of 21° (PDBN $\alpha = 21^\circ$) exhibits 11.19 % higher thrust compared to both PDBN $\alpha = 7^\circ$ and PDBN $\alpha = 14^\circ$ when NPR is set to 7°. Throughout the rest of the space flight, PDBN $\alpha = 7^\circ$ demonstrates superior performance in comparison to the other nozzles. Notably, it achieves a remarkable 10.89 % increase in thrust force for NPR = 20. Additionally, PDBN $\alpha = 7^\circ$ attains its maximum thrust at lower altitudes compared to the other nozzle designs.

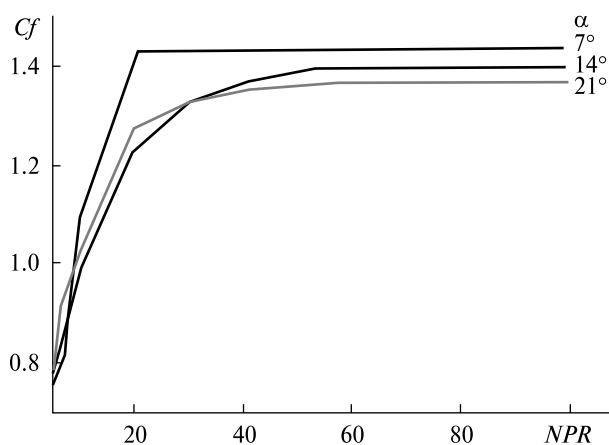


Figure 17. Comparison of thrust coefficient for different values of inflection angle

7. CONCLUSION

At the beginning of our study, we undertook an in-depth investigation of the field of propulsion nozzle design to explore the various flow behaviors through these devices. Our focus was particularly on examining two types of supersonic nozzles: the expansion-deflection nozzle and the planar dual bell nozzle (PDBN), as these configurations are still under study. The evolution of flow parameters Mach number and pressure was studied and analyzed using the simulation software ANSYS-Fluent. To carry out our study successfully, we employed a numerical simulation approach using a two-dimensional model to represent the propulsion nozzles. We assumed

a perfect gas in our calculations, allowing us to consider the primary flow characteristics.

Our study was structured into three distinct parts, each aimed at examining different aspects of propulsion nozzles based on variations in the NPR. Here is a detailed description of each of these parts:

- **Simulation of the Expansion-Deflection Nozzle (E-D):** In this part, we conducted simulations for both viscous and inviscid cases of the E-D nozzle. The objective was to analyze the flow characteristics through this nozzle in these two regimes. By utilizing the ANSYS-Fluent simulation code, we were able to study and compare flow behaviors, particularly in terms of Mach number, pressure, and generated thrust.

- **Comparison between E-D and Convergent-Divergent Nozzles (CN):** In this part, we conducted

a detailed comparison between the E-D nozzles and the CN nozzles, examining parameters such as Mach number, pressure, and thrust. This comparison allowed us to gain a better understanding of the differences and relative advantages of these two types of supersonic nozzles.

- **Simulation of Planar double bell Nozzle:** We also focused on the PDBN and conducted simulations for a viscous flow, varying the inflection angle of the nozzle. The objective was to evaluate the impact of the geometric parameter on the performance of the PDBN and compare the obtained results.

During the design of a nozzle, it is crucial to consider the influence of the radius of the inflection angle on the flow behavior inside the nozzle. This will enable us to design a nozzle that best meets our specific performance requirements.

REFERENCES

1. Davis K., Fortner E., Heard M., McCallum H., Putzke H. (2015). Experimental and computational investigation of a dual-bell nozzle. *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting* (5–9 Jan., 2015, Florida).
2. Durif O. (2022). Design of de Laval nozzles for gas-phase molecular studies in uniform supersonic flow. *Phys. of Fluids*, Issue 34.
3. Hadjadj A., Onofri M. (2009). Nozzle flow separation. *Shock Waves*, Issue 19, 163–169.
4. Hagemann G., Immich H., Van Nguyen T., Dumnov G. E. (1998). Advanced rocket nozzles. *J. Propulsion and Power*, Issue 14, 620–634.
5. Hakim K., Haif S., Abada O. (2023). Design process and flow field analysis of a double divergent supersonic nozzle: Enhancing efficiency and performance. *Int. Conf. on Pioneer and Innovative Studies* (5–7 June 2023, Konya).
6. Horn M., Fisher S. (1993). Dual-bell altitude compensating nozzles. *Pennsylvania State Univ., NASA Propulsion Engineering Research Center*, 2.
7. Kbab H., Abada O., Haif S. (2023). Numerical Investigation of Supersonic Flows on Innovative Nozzles (Dual Bell Nozzle). *J. Applied Fluid Mechanics*, Issue 16, 819–829.
8. Khan S. A., Ibrahim O. M. Aabid A. (2021). CFD analysis of compressible flows in a convergent-divergent nozzle. *Materials Today. Proceedings*, Issue 46, 2835–2842.
9. Michael R., Goldman L. Computer program for design of two-dimensional supersonic nozzle with sharp-edged throat. *NASA TM X-1502*.
10. Nürnbergger-Génin C., Stark R. (2010). Experimental study on flow transition in dual bell nozzles. *J. Propulsion and Power*, Issue 26, 497–502.
11. Ostlund J., Muhammad-Klingmann B. (2005). Supersonic flow separation with application to rocket engine nozzles. *Appl. Mech. Rev.*, Issue 58, 143–177.
12. Reijasse P., Coponet D., Luyssen J. M., Bar V., Palerm S., Oswald J., Kuszla P. (2011). Wall pressure and thrust of a dual bell nozzle in a cold gas facility. *Progress in Propulsion Phys.*, Issue 2, 655–674.
13. Schneider D., Génin C. (2016). Numerical investigation of flow transition behavior in cold flow dual-bell rocket nozzles. *J. Propulsion and Power*, Issue 32, 1212–1219.
14. Schomberg K. A., Doig G., Olsen J., Neely A. J. (2014). Geometric analysis of the linear expansion-deflection nozzle at highly overexpanded flow conditions. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf.* (28–30 July, 2014, Cleveland).
15. Schomberg K., Olsen J., Neely A., Doig G. (2014). Experimental analysis of a linear expansion-deflection nozzle at highly overexpanded conditions. *19th Australasian Fluid Mechanics Conf.* (8–11 December, 2014, Melbourne).
16. Shrivastava K., Das A. K., Saha U. K. (2023). A neural network based design of a planar double divergent nozzle. *25th AIAA Int. Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conf.* (May 28 – June 1, 2023, Karnataka).

17. Verma S., Hadjadj A., Haidn O. (2015). Unsteady flow conditions during dual-bell sneak transition. *J. Propulsion and Power*, Issue 31, 1175—1183.
18. Verma S., Stark R., Haidn O. (2013). Reynolds number influence on dual-bell transition phenomena. *J. Propulsion and Power*, Issue 29, 602—609.
19. Zebbiche T. (2005). Supersonic plug nozzle design. *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit* (10—13 July, 2005, Arizona).

Стаття надійшла до редакції 10.10.2023

Після доопрацювання 10.01.2024

Прийнято до друку 16.01.2024

Received 10.10.2023

Revised 10.01.2024

Accepted 16.01.2024

О. Абада, проф.

E-mail: abadaomar@ymail.com

Х. Кбаб, проф.

E-mail: k71hakim@gmail.com

С. Хайф, Doctoral degree

ORCID 0000-0002-9810-761X

E-mail: haif.sidali@etu.univ-blida.dz

Aeronautical Sciences Laboratory (LSA)

Aeronautics and Space Studies Institute

Blida 1 University BP270 Soumaa street, Blida, Algeria

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ НАДЗВУКОВОГО ПЛАНАРНОГО ДВОКОНТУРНОГО СОПЛА

Двоконтурні форсунки є перспективним рішенням для максимізації ефективності руху на великих висотах, а також пом'якшення небезпечних бічних навантажень на низьких висотах. Такі форсунки складаються з двох різних контурів, причому перший оптимізовано для роботи на низькій висоті, а другий — для роботи на великій висоті. Ці контури з'єднані між собою в точці перегину. Дане дослідження зосереджено на оптимізації конструкції контуру плоского подвійного розтрубного сопла. З використанням комерційного програмного забезпечення ANSYS-Fluent досліджено вплив кута перегину на перехід між двома режимами роботи, вивчено поведінку потоку всередині сопла та оцінено вплив кута перегину на коефіцієнт тяги.

Ключові слова: двоконтурні форсунки, кут перегину, оптимізація.

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.028>
UDC 523.3

I. O. HUSAROVA¹, Leading Researcher, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher
G. G. OSINOVYY², Head of Project Department, Doctor of Philosophy
L. P. POTAPOVYCH³, Scientific Secretary — Head of the Scientific and Educational Center,
Candidate of Engineering Sciences

Yuzhnoye State Design Office named after M. K. Yangel
3, Kryvoriz'ka Str., Dnipro, 49008 Ukraine
E-mail: info@yuzhnoye.com

TECHNOLOGY FOR WATER MINING ON THE MOON WITHOUT ICE PHASE CHANGE

An analytical study into technologies developed for mining water on the Moon has been carried out, and its results demonstrate that methods without the ice phase change are energy efficient. Based on an analysis of temperature distribution over the regolith depth at the lunar poles, it was found that water in the form of ice can be present at depths less than 11 cm. According to their properties, ice regoliths are not loose rocks like dry regoliths but rather hard. With this in mind, a two-phase technology has been proposed to extract water from ice regolith without the ice phase change: the extracted raw material is first crushed and then separated by screening. The regolith hardness rapidly increases as water content increases. Since the equipment mass and power increase as the material hardness increases, in the first phase of the Moon exploration, it is advisable to mine and process ice regoliths with an ice content of ~1.6 %, which are relatively soft rocks with a hardness of 2. Small mobile excavators, already developed and tested, can be used for digging such materials, and impact crushers with low weight and power can be used for processing the raw materials.

The concept of an integrated system for separating ice from regolith without the ice phase change has been developed based on a selective impact crusher, which combines the operations of crushing the extracted raw materials and separating individual components in one device. Selective impact crushers are the most energy-efficient pieces of equipment for crushing and separating raw materials. The power consumption of the proposed integrated selective crushing system to separate ice from regolith for mining 100 kg of ice per hour is 118 W, which is comparable with the Aqua Factorem system (100 W) and significantly less than the power consumption required for the thermal method, i.e., 800 kW.

Keywords: water mining, Moon, ice regoliths, without ice phase change.

INTRODUCTION

In recent years, research and exploration of the Moon have again attracted the attention of space agencies around the world. There are currently scientific and potentially commercial reasons for humanity's return to the Moon. Today, the main competitors in the Moon race are the United States, the People's

Republic of China, Europe, India, Japan, and the number of these countries is increasing.

The driving force that makes the major powers to strive for the Moon exploration is lunar resources, which can solve the approaching global energy crisis, as well as contribute to further technological progress and colonization of not only the Moon but also

Цитування: Husarova I. O., Osinovy G. G., Potapovych L. P. Technology for water mining on the Moon without ice phase change. *Space Science and Technology*. 2024. **30**, № 2 (147). P. 28—37. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.028>

© Publisher ПН «Akadempriodyka» of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

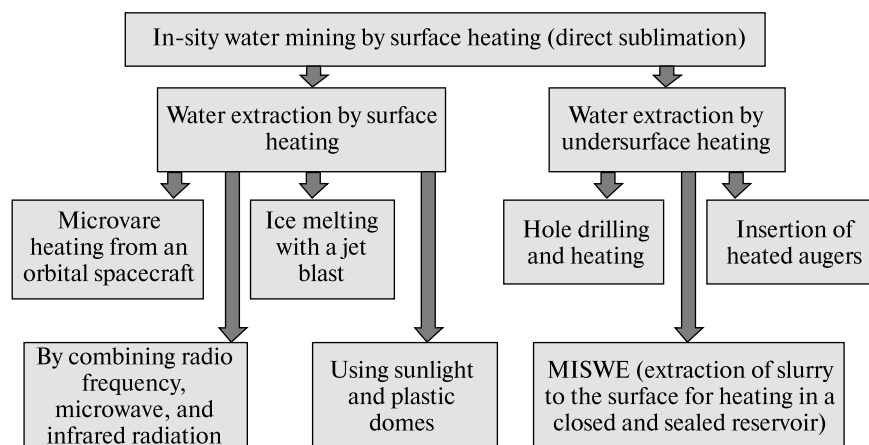


Figure 1. In-situ surface-heating thermal mining technologies

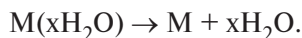
Mars. Using local natural resources will support the stable lunar base infrastructure on the lunar surface.

Potentially, the main resource of the lunar base is ice, which is necessary for life support systems (growing plants, manufacturing propellants, extracting oxygen for breathing, etc.). NASA's return to the Moon, the Artemis Program, is targeting future astronaut landings in 2024 near the lunar South Pole, where ice may be present. This ice will be a key resource for long-duration lunar missions and will also be able to support deep space exploration.

There are three methods for mining water from raw materials: thermal, mechanical, and chemical, i.e., by hydrogen reduction of lunar soil oxides.

During the thermal process, the regolith, which contains free or bound water, is heated to remove vapor. In the case of regolith-ice mixtures, the addition of heat directly converts ice into a vapor phase that can be removed.

In the case of water bound within regolith particles, the addition of heat will first break any bonds between the water molecules and other compounds (e.g., hydrated water attached to another molecule), i.e.:



The evaporation process in ice regolith occurs at a lower temperature than in the extraction of bound water, which usually requires a higher temperature to break the hydration bonds [4].

The technologies of thermal extraction of water from the original lunar raw material (regolith or ice) can be grouped into two classes:

- Extraction based on the removal of icy regolith from the subsoil with subsequent transportation to the processing site. Excavation of the surface using rovers equipped with shovels, bucket ladders, or bucket wheels is typical. Excavation methods require excavating, transporting, and processing large volumes of regolith.

- Thermal extraction based on the sublimation of ice directly from the surface using directed energy, such as sunlight, microwave, or radiant heaters (Figure 1). It is an effective method of ice mining, requiring equipment with less weight and fewer moving parts compared to the excavation methods, and it is a real alternative to excavation [2, 5].

Today, under NASA programs, a significant number of technologies and equipment are developed for extracting water from regolith by various phase-change-based thermal methods: injecting energy into the regolith to sublimate ice into vapor, then capture the vapor, refreeze it and transport the solid ice for storage or further processing. A system for thermal water production, which will be launched to the Moon on board the RESOLVE module, has been manufactured and tested. The equipment package includes an RVC regolith volatile chamber oven that uses a unique fluidization technique and microwaves to penetrate the regolith, which provides more uniform heating (Figure 2) [12].

Thermal water extraction technologies require a lot of power during the heating of the entire mass of the regolith for further ice sublimation. The methods

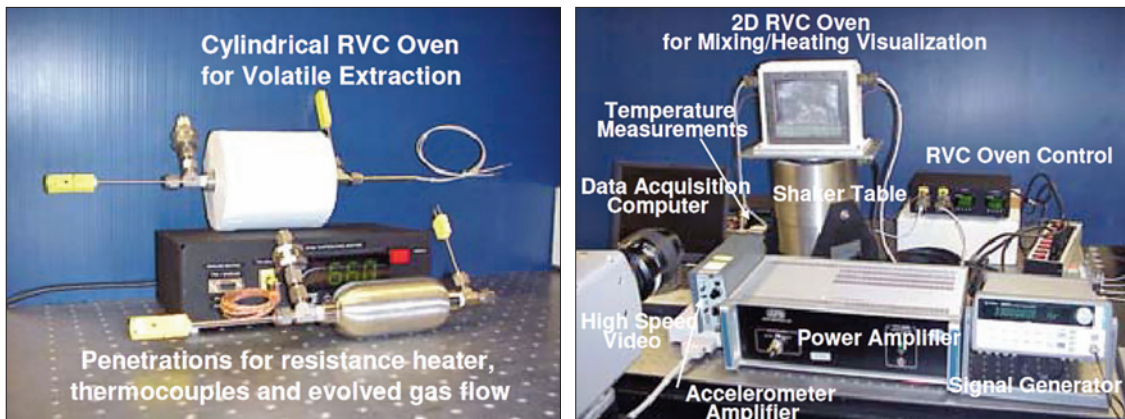


Figure 2. RVC oven layout [1]

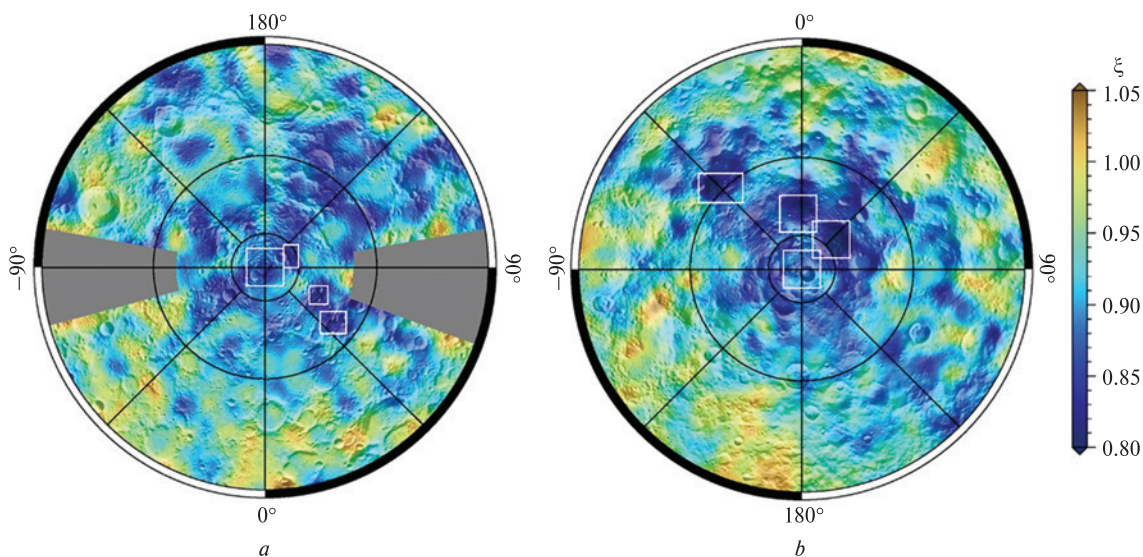


Figure 3. Map of hydrogen distribution at the North (a) and South (b) lunar poles [6]

Table 1. The minimum, average, and maximum temperature as a function of depth for the eight polar regions [6]

Rol	T, K (Min/Avg/Max)			
	Surface	2.25 cm	11 cm	185 cm
SP – central	23.35/184.18/339.07	23.59/187.39/261.20	23.91/187.82/203.66	27.91/191.66/191.77
SP – Haworth	23.35/182.85/320.82	23.59/193.80/253.88	23.91/194.81/206.88	27.91/198.62/198.65
SP – Cabeus	23.35/188.70/330.89	23.59/200.97/262.02	23.91/202.10/212.77	27.91/205.89/205.92
SP – Shoemaker	23.35/184.10/338.26	23.59/188.02/260.89	23.91/189.06/203.24	27.91/192.89/192.93
NP – central	23.35/189.35/330.46	23.59/192.38/255.71	23.91/192.86/204.20	27.91/196.70/196.88
NP – Peary	23.35/180.48/327.22	23.59/192.38/256.75	23.91/193.44/204.43	27.91/197.25/197.32
NP – Fibiger	23.35/183.54/333.72	23.59/195.18/260.61	23.91/196.30/206.47	27.91/200.08/200.13
NP – Whipple	23.35/189.34/330.94	23.59/192.38/256.63	23.91/192.86/204.20	27.91/196.69/196.88

of separating water ice from regolith without changing the water ice phase, i.e., mechanical separation of the mixture, are considered more energy efficient. Let's discuss them.

STATEMENT OF RESEARCH PROBLEM

The purpose of the research is to develop a technology and equipment concept for water extraction by mechanical method to meet NASA requirements regarding the water ice separation from regolith without the phase change [13].

Today, we know about the only concept of water mining by mechanical method, which was proposed by the scientists of the University of Central Florida: *Aqua Factorem*, ultra-low-energy lunar water mining [9]. This technology will use the effects of meteoroid bombardment of the lunar surface, which has broken up most of the solid material, including ice, into fine grains in the upper churn zone of the lunar regolith. Ice will be separated from a mixture of minerals without the phase change by a size sorting process with ultra-low power consumption. According to experts, using the new method can reduce the power of 800 kW to less than 100 W.

The *Aqua Factorem* technology can be used to extract ice from the surface layer of regolith, crushed naturally. Let's estimate the amount of ice that can be mined using this method.

The exploration of the Moon will start from the South Pole region, so it is at the poles where the presence of water has been investigated. The Lunar Exploration Neutron Detector (LEND) on board the Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) has mapped the lunar polar regions for their abundance of hydrogen, which possibly exists there in the form of water ice (Figure 3). The LEND has detected the presence of hydrogen in the upper ~1 meter of the regolith, which allowed identifying several areas at the North and South Poles where there is much more water ice than elsewhere (marked by squares on the map).

The extremes of the minimum, average, and maximum surface and subsurface temperatures were calculated for these locations (Table 1) [6].

As seen in Table 1, the distribution of the maximum temperatures as a function of depth was analyzed in eight Polar Regions (Figure 4), and it was established that the temperatures are very close in all the sites. The

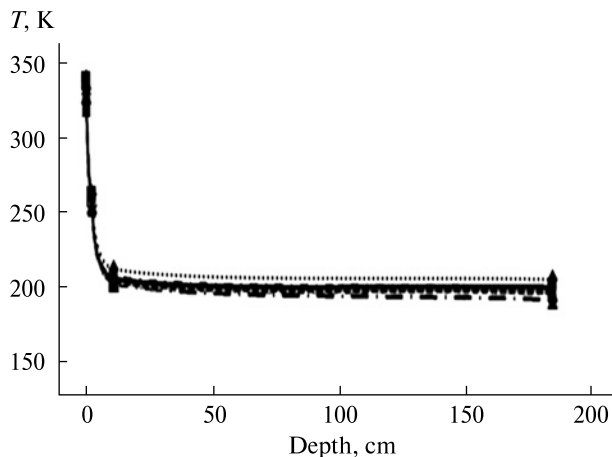


Figure 4. Maximal temperature vs. depth in eight lunar regions (see Table 3)

maximum temperatures reach 320–340 K on the surface and 253–262 K at 2.25 cm depth. According to the water pressure vs. temperature profile, sublimation of ice happens at these temperatures in the extremely rarefied lunar atmosphere (Figure 5). There is probably no ice in the regolith top layers. At 11 cm depth, the temperature is 203–207 K, so these top layers and soft soil layers can contain ice that can be mined.

Ice exists in many modifications (I...XVIII), which differ in their physical characteristics, namely, in terms of strength, density, etc. (Figure 5). The pressure on the Moon is approximately 10 nPa. In these conditions, at above 170 K, the ice is in the Ih modification. The Ih Ice is a regular hexagonal crystalline ice. Almost all the ice on Earth belongs to this modification, and its properties have been carefully studied.

The regolith density in the top layer is 800–1000 kg/m³, but it increases rapidly with depth, and its greatest changes occur at 10–30 cm depth, where it reaches 1500–1700 kg/m³ (Figure 6). The data refer to the density of dry regolith. Tests into the effect of water ice concentration in the 0–11 % mass range showed that the compacted and frozen simulant behaves more like a rock than a granular soil [1].

PROBLEM SOLUTION

Excavation of ice regolith deposits from a depth of more than 15–30 cm will be technologically more difficult than from the top layers, the raw material may be in the form of frozen lumps of regolith with

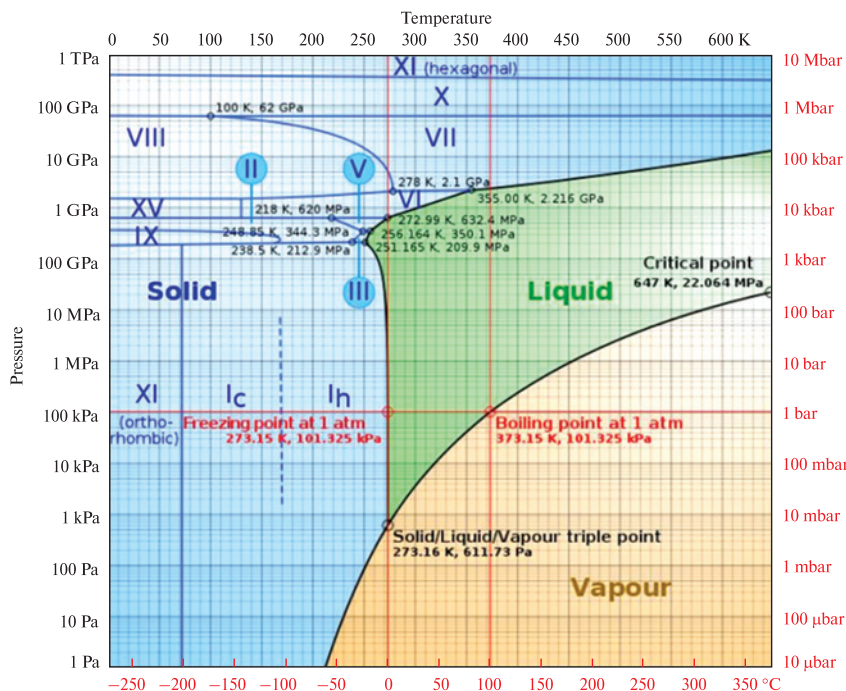


Figure 5. Phase diagram of water

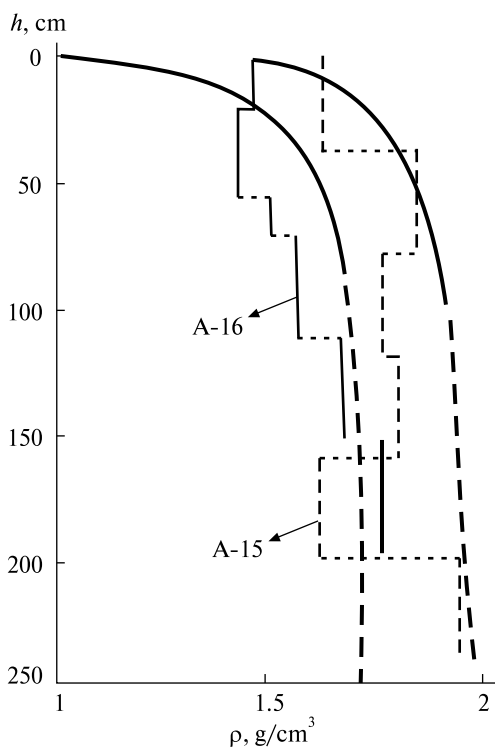


Figure 6. Regolith density ρ vs. depth h (according to A-15, 16 deep drilling data) [10]

ice. To solve the problem of effective water extraction by mechanical method, it is proposed to extract ice from a depth of more than 11 cm in two phases: first, the frozen lumps of ice regolith need to be crushed, and then the ice needs to be mechanically separated from the regolith.

The method of raw material crushing is selected depending on the physical and mechanical properties and the particle size of the initial material and the final product. The parameter used when selecting the crushing method is the rock hardness: a general conventional concept that characterizes a set of mechanical properties of rocks, which is manifested in various processes during mineral extraction and processing. The rock hardness ranges from 20 for the strongest rocks (quartzites, basalts) to 0.3 for floating rocks (swamps, marshy soil). Dry regolith is a loose rock with a hardness of 0.5. Frozen soils have a hardness of 2.0 and belong to fairly soft rocks [14].

Experimental studies with the simulant found that ice regolith behaves as follows with the indicated ice content:

- 0.6 to 1.5 %, like weak shale or mudstone (hardness of 2.0, fairly soft rocks)

— ~8.4 %, like moderate-strength lime stones, sandstones, and shales (hardness of 4.0, medium-strength rocks)

— ~10.6 %, strong limestone or sandstone (hardness of 8–10, hard rocks) [8].

Jaw crushers and cone crushers, designed for crushing high- and medium-strength abrasive materials, can be used for crushing regolith with ~10.6 % ice content; roll crushers can be used for ~8.4 % ice content, which corresponds to medium-strength materials, and impact crushers, used for low- and medium-strength materials with low abrasiveness, can be used for the ice content of 0.6–1.5 %. The advantages and disadvantages of each crusher type are shown in Table. 2.

The analysis established that impact crushers have a simple, compact, and reliable design and low power consumption. Their disadvantage is the rapid wear of the hammers, which can be solved by choosing modern materials.

Since the requirements for the Moon exploration equipment are very rigorous: low weight, low power consumption, resistance to the abrasive lunar dust, vacuum, low temperatures, and radiation, in the initial phase of the Moon exploration, it is advisable to use integrated selective-crushing systems based on an impact crusher for regolith with a small amount of ice. Small mobile excavators, which have already been developed and tested, can be used to excavate such regolith.

The technology of separating ice from a mixture of minerals without phase change by sorting with a combination of pneumatic, magnetic, and electrostatic separation was developed by scientists of the

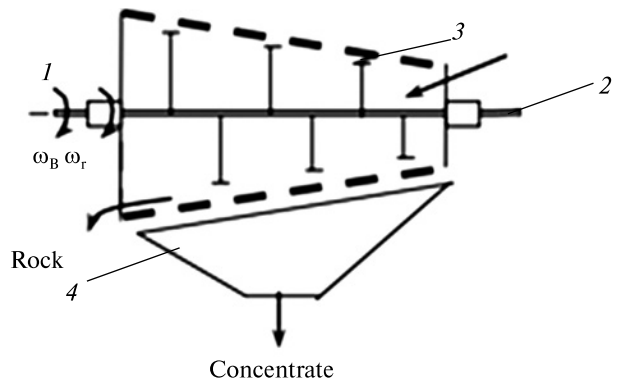


Figure 7. Integrated selective crushing system for separating ice from regolith (1 – conical screen, 2 – shaft, 3 – hammers, 4 – concentrate collector)

University of Central Florida: Ultra-Low-Energy Lunar Ice Mining “Aqua Factorem” [9].

The disadvantage of this technology is its complexity and the need to use a significant amount of equipment. An alternative can be sieving the product of selective crushing of the ice regolith through a sieve.

The advantage of impact crushers is the combination of crushing and screening (sorting) in one device, which is implemented in the terrestrial technology of selective crushing and selective grinding for crushing and separation of the components with different strengths.

The integrated selective crushing system based on an impact crusher for separating ice from regolith on the Moon is a conical sizing screen with a shaft with hammers installed in the center (Figure 7). The regolith, which is not crushed, goes into the over-screen

Table 2. Crusher design and performance

Crusher	Advantages	Disadvantages
Jaw crushers with a simple jaw movement	Simple design, low height	Hard rocks crushing into large and medium lumps
Jaw crushers with a complex jaw movement	Simple design	Material heating with friction during abrasion; water loss
Cone crushers	Designed for coarse, medium, and fine crushing	Heavy weight (heavier than jaw crushers), complex
Roll crushers	Simple compact design, reliability	Low output, high specific power consumption
Impact crushers (hammer and rotary)	Simple compact design, reliability. High output, low specific power consumption	Crusher hammers wear out quickly

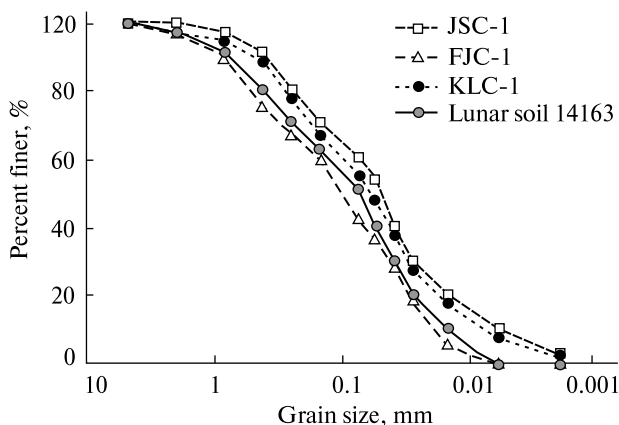


Figure 8. Particle size distribution of real lunar regolith and lunar simulants JSC 1, FJS-1

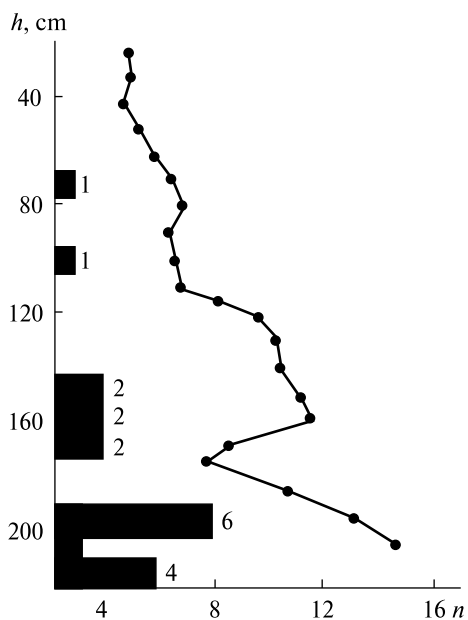


Figure 9. Average amount n of regolith particles with a diameter of more than 5 mm (dotted line) and more than 1 cm (black strips) along the vertical column h of soil of the A-15, drilling diameter 20 mm

Table 3. Ice and regolith characteristics

Parameter	Ice	Regolith
Density, kg/m ³	760–950	1150–1800
Breaking strength, MPa	0.92–0.36	
Compressive strength, MPa	1.11	75–100
Shear strength, MPa	0.58	

product, and the crushed ice into the under-screen product.

The crusher is installed horizontally, and ice regolith moves because of the inclination of the conical surface of the sizing screen.

For sieving the product of selective crushing of the ice regolith through a sieve, preliminary estimates have been given using the properties of frozen soils on Earth because it is quite uncertain if there is water ice on the Moon and in which form water on the Moon exists.

Ice in frozen soils on Earth can be in the form of ice cement, ice inclusions, and massive deposits of ground ice. Ice cement is small crystals of various sizes embedded in the soil skeleton and cementing the minerals. The ice inclusions are various lenses, veins, and layers with a thickness from fractions of a millimeter to tens of centimeters [7]. After the ice is separated by crushing the ice regolith, its particles will have dimensions of the order of 0.25–0.2 mm.

Cone crushers for fine crushing have a degree of crushing of 10–15, so the size of raw material lumps must be of the order of 2–2.5 cm. Extraction of raw materials will be carried out by compact excavators with little effort, so probably the size of lumps of frozen regolith will be exactly this.

The structure of ice regolith can be considered as a composite material with chaotic reinforcement, where the soil is the reinforcing phase and the ice is the binder. The destruction occurs in the less strong phase, that is, in the layers of ice, which has a strength almost an order of magnitude less (see Table 3). Regolith is an unsorted sandy siltstone soil that varies in the upper soil layer from medium sand to fine silt: on average, 95 % of the soil is smaller than 1.37 mm by mass; and 5 % is smaller than 0.01 mm (Figure 8) [11].

The change in the granulometric composition of the regolith with depth has not been sufficiently studied. There are reasons to believe that the degree of shock-explosive processing of the regolith material decreases with depth. The results of drilling in the area of the A-15 landing (Figure 9) and geological and morphological observations on Luna-2 confirm this assumption [15].

In the regolith surface layer, the content of particles with $D \geq 1$ mm is about 10 %, $D \geq 5$ mm, 20 %, and

and at a depth of 1.5 m, their number increases approximately three times, and they account for the bulk of the regolith. Therefore, it is likely that when using a working sieving surface with a hole diameter of 0.2–0.25 mm, the ice crushed to the size of the smaller size of the holes of the sieving surface of the screen is released into the under-sieve product.

Since the ice particles are very small (0.2 mm), and the gravitational force on the Moon is six times lower than on Earth, it is necessary to impart the particles with a velocity sufficient for them to pass through the holes in the sieve. For this, the centrifugal force created by the rotation of the crusher body can be used. In the field of centrifugal forces, the ice particles will be thrown out through the sieve holes, and the regolith particles will settle on the drum walls, cut with a knife on the way and discharged from the installation.

The speed of particle deposition, at which the ice will pass through the sieve and the regolith will settle on its surface without disturbing the process of sieving the target product, is regulated by the rotation speed of the case.

To develop a perfect technology for sieving the product of selective crushing of the ice regolith, development testing is required using lunar regolith or its simulants. Such testing will be planned subject to the involvement of foreign partners.

The over-sieve product is unloaded at the exit from the conical screen.

The efficiency of existing single-rotor hammer crushers was analyzed to estimate the power consumption of separating 100 kg/h of ice from regolith (see Table 4) [15].

The crusher efficiency (E) is estimated by the amount of crushed (ground) product per 1 kWh of

consumed power. The inverse of the efficiency is called the specific power consumption. It is very close to the analyzed systems and ranges from 1.14 to 1.21 W h/kg. The estimated specific power consumption of the selective crushing system for separating ice from regolith with an output of 100 kg/h, calculated from the average value for existing crushers, is 1.18 W h/kg, and the power consumption for the production of 100 kg of ice per hour is 118 W. The estimate is made for Earth's conditions. On the Moon, in a vacuum with no air resistance, the power consumption will be lower and will approach the power consumption of the Aqua Factorem method, i.e., 100 kW.

SCIENTIFIC NOVELTY

For the first time, based on the analysis of existing data on the distribution of maximum temperatures by depth in the eight lunar regions at the South and North poles, it was demonstrated that the maximum temperatures throughout the polar plane are similar and reach 320–340 K on the surface and 253–262 K at 2.25 cm depth. At these temperatures, ice sublimates in the lunar environment, so there is probably no ice in the top layers.

For the first time, the concept of extracting water by the mechanical method has been further developed in terms of the use of ice regolith from a depth of more than 11 cm, where the temperature is 203–207 K, and there is no ice sublimation. It is proposed to extract ice in two phases: crushing frozen lumps of ice regolith and then separating ice with mechanical equipment. For the first time, the dependence of the ice regolith hardness on the frozen water content was estimated, the strength increasing from 2 to 10 as water content increased from 1.5 to 10.6 %.

Table 4. Single-rotor hammer crusher efficiency

Parameter	Unidirectional crushers			Notes
	M6-4Б	M13-16B	M20-30Г	
1	2	3	4	5
Output, kg/h	14000	175000	1050000	Output 0.1 t/h for the Moon, according to NASA data [11]
Electric motor power, kW	17	200	1250	
Specific power consumption, W·h/kg	1.21	1.14	1.19	We take the average value of Columns 2–4, i.e. 1.18

CONCLUSIONS

Based on the analysis of lunar water extraction methods, it is shown that water vapor extraction from the lunar regolith by the thermal method requires high levels of thermal power. Therefore, methods of mechanical separation of water ice from regolith without the phase change are of interest.

Taking into account the temperature distribution by the regolith depth at the lunar poles, it was established that water in the form of ice is probably present at depths of less than 11 cm. It has been shown that the ice regoliths are quite hard, so it is necessary to first crush the extracted raw materials and then separate them by screening or other methods of beneficiation.

Since the equipment mass and power increase as the material hardness increases, in the first phase of the Moon exploration, it is advisable to use selective impact crushers, as they are the most energy-efficient pieces of equipment for crushing and separating raw materials. Such equipment can be used for icy regolith with a nice content of ~1.6 % and hardness of 2, with small mobile excavators, already developed and tested, used for regolith excavation.

The integrated selective crushing system is proposed to separate ice from regolith. The power consumption of the proposed system for mining 100 kg of ice per hour is 118 W, which is comparable with the *Aqua Factorem* system (100 W) and significantly less than the power consumption required for the thermal method, i.e., 800 kW.

REFERENCES

1. Carrier D., Olhoef G., Mendell W. (1991). Physical properties of the lunar surface. *Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon*, Cambridge: University Press, 475—594. ISBN 0521334446. URL: https://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter09.pdf (Last accessed: 29.04.2023).
2. *Extracting Water from the Moon with Basic Home Appliances* (2008). URL: <https://www.universetoday.com/19244/extracting-water-from-the-moon-with-basic-home-appliances> (Last accessed: 29.04.2023).
3. Florenskiy K. P., Bazilevsky A. T., Nikolayeva O. V. (1975). *Lunar soil: properties and analogues. 1974 Model*. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, 50 p.
4. Hegde U., Balasubramaniam R., Gokoglu S. (2012). Analysis of Water Extraction from Lunar Regolith. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, Tennessee. URL: <https://AIAA2012-634-2071WaterExtraction.pdf> (Last accessed: 29.04.2023).
5. *How NASA Hopes to Mine Water on the Moon* (2009). URL: <https://www.space.com/7350-nasa-hopes-water-moon.html> (Last accessed: 29.04.2023).
6. Gläser P., Sanin A., Williams J.-P., Mitrofanov I., Oberst J. (2020). *Temperatures Near the Lunar Poles and Their Correlation With Hydrogen Predicted by LEND*. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2020JE006598> (Last accessed: 29.04.2023).
7. Kramarenko V. V. (2019). *Pedology. Manual*. Moscow: Yuright, 480 p.
8. Mantovani J. G., Swanger A., Townsend I. I., Sibille L., Galloway G. (2014). *Characterizing the physical and thermal properties of planetary regolith at low temperature*. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140017852/downloads/20140017852.pdf> (Last accessed: 29.04.2023).
9. Metzger P. T., Sapkota D., Fox J., Bennett N. (2022). AQUA FACTOREM: Ultra low energy lunar water extraction. final report NASA Innovative Advanced Concepts (NIAC) Phase I Grant Number 80NSSC 20K1022. University of Central Florida, Florida Space Institute. March 15, 2021. URL: https://fsi.ucf.edu/wp-content/uploads/sites/4/2022/11/FInal-Report_Aqua-Factorem_v1.pdf (Last accessed: 29.04.2023).
10. Mitchell J. K., Carrier W. D., Houston W. N., Scott R. F., Brownwell L. G., Durgunoqlu H. T., Hovland H. J., Treadwell D. D., Costes N. C. (1972). Soil mechanics. *Apollo 16 Preliminary Science Report*. Washington, NASA.
11. *Particle size distribution of real lunar regolith and lunar simulants JSC1, FJS1*. URL: https://www.researchgate.net/figure/Particle-size-distribution-of-real-lunar-regolith-and-lunar-simulants-JSC-1-FJS-1-and_fig2_320618170 download? (Last accessed: 29.04.2023).
12. Sanders G. B., Moore L., McKay D. S., Simon T. M., Lueck D. E., Parrish C. F., Johnson K. R., Mungas G., Pelletier M., Sacksteder K., Duke M., Taylor J., Taylor L., Boucher D. (2005). Regolith & Environment Science, and Oxygen & Lunar Volatile Extraction (RESOLVE) for Robotic Lunar Polar Lander Mission. Int. Lunar Conf., 1—16. URL: https://Regolith_and_Environment_Science_and_Oxy-1.pdf (Last accessed: 29.04.2023).

13. *Small Business Innovation Research (SBIR) & Small Business Technology Transfer (STTR) program. Extraction of Oxygen, metal, and water from lunar regolith.* (2022). URL: <https://sbir.nasa.gov/content/extraction-oxygen-metal-and-water-lunar-regolith> (Last accessed: 29.04.2023).
14. Smirnov V. O., Biletskyi V. S. (2012). *Preparatory processes for mineral enrichment. Study guide.* Donetsk: Eastern publishing house, 285 p. [In Ukrainian]
15. Sokur M. I., Biletskyi V. S., Yegurnov O. I., Vorobyov O. M., Smirnov V. O., Bozhik D. P. (2017). *Preparation of minerals for beneficiation: monograph.* Kremenchuk, 392 p. [In Ukrainian]

Стаття надійшла до редакції 26.06.2023

Після доопрацювання 12.12.2023

Прийнято до друку 20.12.2023

Received 26.06.2023

Revised 12.12.2023

Accepted 20.12.2023

I. O. Гусарова, пров. наук. співроб., д-р техн. наук, член-кор. Академії технологічних наук України, лауреат Нац. премії України імені Бориса Патона

E-mail: info@yuzhnoye.com

Г. Г. Осіновий, нач. проєктного відділу, д-р філософії

Л. П. Потапович, учений секретар — нач. науково-освітнього центру, канд. техн. наук

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»
вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

ТЕХНОЛОГІЯ ВИДОБУТКУ ВОДИ НА МІСЯЦІ БЕЗ ЗМІНИ ФАЗИ ЛЬОДУ

Проведено аналітичне дослідження відомих технологій видобутку води на Місяці та доведено, що енергоефективними є методи, що не потребують зміни фази льоду. На основі аналізу розподілу температури по глибині реголіту на місячних полюсах встановлено, що вода у формі льоду може бути наявна на глибинах менш ніж 11 см. Крижані реголіти за своїми властивостями не є сипучими породами, як сухий реголіт, а досить тривкі. Тому для видобутку води з крижаного реголіту без зміни фази льоду запропоновано двостадійну технологію: спочатку подрібнення видобутої сировини, а потім розділення її грохоченням. Ступінь тривкості реголіту стрімко зростає при збільшенні вмісту води. Оскільки маса та потужність обладнання збільшується при збільшенні ступеня тривкості матеріалу, на першому етапі освоєння Місяця доцільно видобувати та обробляти крижані реголіти з вмістом льоду 1.6 %, що належать до досить м'яких порід і мають ступінь тривкості 2. Для викопування таких матеріалів можна використовувати невеликі мобільні екскаватори, що вже розроблені і протестовані, а для обробки сировини застосовувати дробарки ударної дії, що мають малу масу та потужність.

Опрацьовано концепцію комплексної системи відокремлення льоду від реголіту без зміни фази льоду на основі дробарки ударної дії вибіркового дроблення, що поєднує операції подрібнення видобутої сировини і розділення окремих компонентів в одному пристрої. Дробарки ударної дії вибіркового дроблення є найбільш енергоефективним обладнанням для подрібнення та розділення сировини. Витрати потужності запропонованої комплексної системи вибіркового дроблення для відокремлення льоду від реголіту на видобуток 100 кг льоду на годину становлять 118 Вт, що близько до витрат системи «Aqua Factorem» (100 Вт) і значно менше від витрат термічного методу (800 кВт).

Ключові слова: видобуток води, Місяць, крижані реголіти, фази льоду.

Стосовно рукопису статті

І. Гусарової, Г. Осінового, Л. Потапович

«Технологія видобування води на Місяці без зміни фази льоду»

Скажу відверто, що прохання академіка-секретаря Відділення наук про Землю О. М. Пономаренка надати відгук на рукопис статті стосовно видобутку води на Місяці застало мене зненацька. Але оскільки в цей час я готував для Геофізичного журналу відгук на рукопис статті В. В. Гордієнка, присвяченої формуванню земної кори та появі води на Землі, то я дав згоду ознайомитись і висловити свою думку.

Раніше до інформаційних повідомлень щодо наявності води на Місяці я відносився скептично, а про розробки технології її видобутку навіть не здогадувався. Тому наведене у рукопису аналітичне дослідження технологій для видобутку води на Місяці і продемонстровані авторські розробки енергоефективних методів я відправив на рецензію В. С. Білецькому, оскільки посилення на навчальний посібник і монографію авторських колективів за його участі наведено у переліку використаних джерел.

Мене, як геофізика, більш зацікавив виконаний авторами аналіз розподілу температури по глибині реголіту на полюсах Місяця, а також фізичні властивості крижаних реголітів як початкового матеріалу для розробки концепції інтегрованої системи відділення з них льоду. Стисло висловлю свої міркування з цього приводу.

В останні роки я все частіше потрапляв на наукові статті щодо доказів існування води на супутнику Землі. Припущення про те, що водяний лід може бути ув'язненим у місячних холодних полярних кратерах, понад півстоліття тому висунув Ватсон та ін. [Watson, K., Murray, B., & Brown, H. (1961). On the possible presence of ice

on the Moon. *Journal of Geophysical Research*, 66, 1598—1600]. Однак тільки з застосуванням низьки дистанційних методів були отримані результати щодо виявлення та кількісної оцінки потенційних скупчень, які не можна однозначно пов'язати з наявністю водяного льоду, але можна пояснити присутністю мінеральної речовини, яка містить гідроксил (ОН) тощо.

Прямі докази наявності водяного льоду на поверхні Місяця були отримані в останні роки із застосуванням двох технологій дистанційного зондування.

Перше підтвердження відбулося в 2008 році, коли дані індійського космічного корабля «Чандраяан-1» виявили ознаки подібних до води молекул на південному полюсі Місяця. Потім NASA запустило космічний корабель під назвою LCROSS, який впав на Місяць у 2009 році, піднявши матеріал і підтвердивши наявність води у певній формі. А в 2018 році дослідники, використовуючи самі ті дані, знайшли прямі докази водяного льоду на полюсах [Li, S., Lucey, P. G., Milliken, R. E., Hayne, P. O., Fisher, E., Williams, J.-P., et al. (2018). Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 115(36), 8907—8912].

Вдруге, завдяки Стратосферній обсерваторії інфрачервоної астрономії (SOFIA), вдалося зафіксувати специфічну унікальну хвилю для молекул води в одному з найбільших кратерів у Південній півкулі Місяця [Honniball C. I., Lucey P. G., Li S., Shenoy S., Orlando T. M., Hibbitts C. A., et al. (2020). Molecular water detected

on the sunlit Moon by SOFIA. *Nature Astron.*, **5**, 121–127]. До цього ознаки наявності води вдавалося виявити лише на неосвітлених частинах супутника Землі. Однак, попри важливість цих відкриттів, остаточного розуміння природи водних накопичень на Місяці досі немає.

Згідно з дослідженнями NASA, у кратерах на полюсах Місяця, куди практично не потрапляє сонячне світло і де температура досягає мінус 120 градусів за Цельсієм, може бути достатньо води у крижаному стані. Але навіть якщо вдасться підтвердити наявність значних обсягів льоду на Місяці, головною проблемою залишається видобуток з них води, яка не може існувати на поверхні Місяця в рідкому стані, бо вона моментально випарується. Слід мати на увазі, що кратери на південному полюсі Місяця небезпечно холодні за земними мірками, що практично унеможливує добування крижаного льоду за допомогою сучасних технологій. Тому більш привабливими видаються результати досліджень, опубліковані в журналі «Nature», стосовно виявлення як безпосередньо молекул води на ділянках Місяця освітлених Сонцем, так і припущення щодо наявності водяного льоду в їхніх кратерах.

Однак автори сконцентрували основну увагу на запозичених у роботі [Glaser P., Sanin A., Williams J.-P., Mitrofanov I., Oberst J. (2021). Temperatures near the lunar poles and their correlation with hydrogen predicted by LEND. *J. Geophys. Res.: Planets*, **126**, e2020JE006598] результатах дослідження місячних полярних регіонів на наявність у них водню у верхньому прошарку реголіту. Зазначені дослідники ідентифікували

кілька аномальних постійно затінених областей, які збігаються з областями пригнічення нейтронів (області надмірної концентрації водню) на Північному та Південному полюсах, в яких можливе існування води у крижаному стані. Для цих восьми аномальних областей були виконані розрахунки мінімальних, середніх та максимальних температур на поверхні та на трьох реперних глибинах. Отримані результати містять хоч і дуже ймовірні, але все ж орієнтовні оцінки. Останнє може слугувати виправданням окремих тверджень авторів рукопису, зокрема висновку, що температури по всіх досліджених полярних площах на глибинах до 2 м однакові (рис. 4). З цим не можу погодитись, через те що на такій значній площі, ще й на двох полюсах Місяця, постійну температуру верхнього шару важко уявити.

Зазначу, що якщо воду з крижаного реголіту можна буде видобувати на Місяці, замість того щоб відправляти її туди із Землі, то наш природний супутник цілком може стати придатним перевалочним пунктом для наступних місій на інші планети. Таким чином, прагнення фахівців Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», застосувати накопичений досвід у гірничій справі на Землі для видобутку води на Місяці заслуговує на увагу.

Головний науковий співробітник
Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна
Національної академії наук України,
доктор геологічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України,
Володимир Коболев

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.040>
УДК 621.791:629.78

Л. М. ЛОБАНОВ, заст. директора, д-р техн. наук, проф., акад. НАН України.
Заслужений діяч науки і техніки України (2004), Золота медаль ім. Б. Патона «За видатні досягнення
у створенні інноваційних науково-технічних розробок, які знайшли широке практичне використання» (2022)
ORCID: 0000-0001-9296-2335

E-mail: office@paton.kiev.ua

Ю. М. ЛАНКІН, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-6306-8086

E-mail: lankin.u.n@gmail.com

Є. Г. ТЕРНОВИЙ, заст. зав. відділу «Космічні технології»

ORCID: 0000-0002-4323-0944

E-mail: ev-geo@ukr.net

Н. В. ПІСКУН, зав. відділу «Космічні технології», д-р техн. наук

ORCID: 0000-0003-1459-2310

E-mail: nadamova54@gmail.com

С. О. ГЛУШАК, наук. співроб.

ORCID: 0000-0003-4518-7262

E-mail: electriber@ukr.net

В. Г. СОЛОВЙОВ, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1454-7520

E-mail: hsova@gmail.com

В.Ф. СЕМІКІН, наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7407-5887

E-mail: semikin.kiev@gmail.com

В. Є. ФЕДОРЧУК, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-9929-3231

E-mail: fedorchuk@paton.kiev.ua

І. І. СТАТКЕВИЧ, наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-9403-2123

E-mail: statkevich_igor@ukr.net

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України
вул. Казимира Малевича 11, Київ, Україна, 03150

ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ МОНТАЖНИХ І РЕМОНТНО-ВІДНОВЛЮВАНИХ РОБІТ НА ПОВЕРХНІ МІСЯЦЯ

При освоєнні Місяця створюватимуться довготривалі місячні бази (ДМБ), а також інші об'єкти, що забезпечують життєдіяльність та роботу експедицій. Це можуть бути монтажні-складальні операції під час створення космічних комплексів або ремонтно-профілактичні роботи, пов'язані із забезпеченням тривалості експлуатації діючих систем.

Цитування: Лобанов Л. М., Ланкін Ю. М., Терновий Є. Г., Піскун Н. В., Глушак С. О., Соловйов В. Г., Семікін В. Ф., Федорчук В. Є., Статкевич І. І. Елементи технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів для монтажних і ремонтно-відновлюваних робіт на поверхні Місяця. *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 2 (147). С. 40—53. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.040>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Експерименти зі зварювання у космосі, проведені на автоматичному обладнанні «Вулкан», а також зварювання ручним електронно-променевим інструментом УРІ у відкритому космосі показали, що електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) є оптимальним технологічним процесом для виконання зварювальних робіт у космічних умовах. При цьому процесі ефективний коефіцієнт корисної дії становить 85...90 %, що є максимальним серед інших способів зварювання. ЕПЗ в умовах земної гравітації дозволяє забезпечити механічні та хімічні властивості зварних з'єднань, а також їхню щільність майже на рівні основного металу конструкції, що є неможливим при інших способах зварювання. Так, коефіцієнт міцності металу шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ, становить 0.85...0.93, а при дугових і плазмо-дугових способах він становить 0.7...0.8. Водночас отримання таких властивостей зварних з'єднань у космічних умовах є складним. Як відомо, знижена гравітація, низькі температури та надвисокий вакуум, які є природним середовищем на місячній поверхні, сприяють утворенню внутрішніх нещільностей у вигляді пор у зварних швах (ЗШ). Це у першу чергу проявляється при зварюванні алюмінієвих сплавів, які використовуються як основний матеріал в конструкціях космічних апаратів.

Для отримання якісних зварних з'єднань і виключення в ЗШ таких дефектів, як пори, тріщини та несплавлення крайків у корені шва, було розроблено і виготовлено систему апаратури періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагрівання по заданій траєкторії.

В результаті проведених технологічних робіт з використанням комплексу апаратури періодичного відхилення електронного пучка було отримано зварні з'єднання (ЗЗ) зі сплавів АМгб, А1570 та 1201 товщиною від 2 до 8 мм. Отримані ЗЗ підлягали візуальному огляду, рентгенівському контролю на визначення зовнішніх і внутрішніх дефектів у швах. Також було проведено механічні випробування на міцність опору розривом, визначено елементний склад та виконано металографічні дослідження ЗЗ, отриманих запропонованим способом. Результати випробувань показали високу якість ЗЗ із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ за допомогою системи періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагріву по заданій траєкторії.

Метою даної роботи були аналіз способів дегазації розплавленого металу зварювальної ванни, а також розробка і випробування елементів технологічного процесу ЕПЗ алюмінієвих сплавів за допомогою створеної апаратури, які при виконанні монтажних та ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні Місяця дозволять отримувати якісні ЗЗ, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення.

Ключові слова: довготривалі місячні бази, надвисокий вакуум, низькі температури, електронно-променеве зварювання, алюмінієві сплави, зварні з'єднання, дефекти у швах, нещільності, пори, система періодичного відхилення електронного пучка, розгортка, рентгенівська дефектоскопія, механічні властивості, елементний склад, макроструктура, мікроструктура, основний метал, метал шва, зона термічного впливу.

Особливі умови на поверхні Місяця ускладнюють проведення технологічних процесів і вимагають створення спеціалізованого обладнання та сучасних і надійних технологій для виконання зварювальних робіт [9, 11]. А такі фактори, як знижена гравітація, низька температура та надвисокий вакуум, що є основними фізичними умовами місячної поверхні, сприяють утворенню дефектів у зварних з'єднаннях (ЗЗ) [3].

Знижена гравітація може сприяти виникненню нещільностей у вигляді пористості у швах, яка пов'язана з тим, що в низьких гравітаційних полях не відбувається природного спливання пухирців пари чи газу зі зварювальної ванни [6]. Це особливо проявляється при зварюванні алюмінієвих та інших матеріалів з підвищеним вмістом розчинених газів (в основному водню), а також в наявності елементів з високою пружністю пари у металі зварної конструкції [2].

Дослідженнями також встановлено, що однією із причин утворення пор при зварюванні алюмінію та його сплавів є водень, що міститься в окисній плівці на крайках зварюваного металу [7].

Відомо, що одним із методів боротьби з підвищеним утворенням пор при ЕПЗ-зварюванні алюмінієвих сплавів є використання модульованої потужності [5]. Але при цьому методі утворюються виплески зі зварювальної ванни у вигляді бризок розплавленого металу, що неприпустимо при проведенні технологічних робіт у космічних умовах [12].

У роботі [5] запропоновано метод зварювання з розщепленням електронного пучка на кілька теплових джерел при скануванні його по заданій траєкторії. Цей метод заснований на динамічному позиціонуванні пучка, який здійснюється за рахунок високочастотного керування переміщенням та відхиленням променя відносно сти-

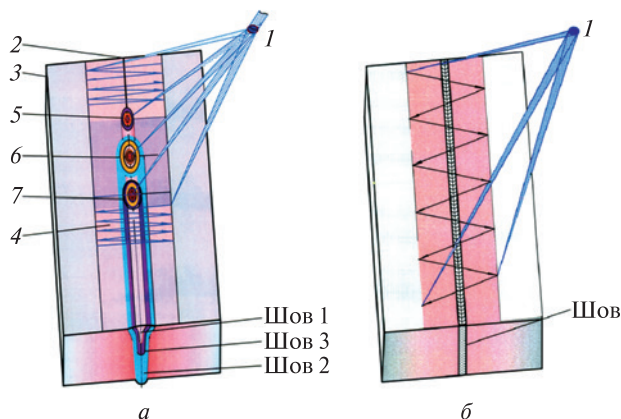


Рис. 1. Схеми процесу електронно-променевого зварювання: *а* — з попереднім підігрівом та підігрівом після зварювання (1 — сканувальний пучок, 2 — зварний штик, 3 — попереднє підігрівання сканувальним пучком, 4 — термообробка після зварювання, 5, 6, 7 — зварювальні ванни 1–3); *б* — при попередній термообробці

ку і його фокусуванням таким чином, що пучок діє одночасно в кількох місцях (рис. 1, *а*) [5]. При цьому відбувається формування декількох теплових джерел, які забезпечують одночасне введення тепла у різні ділянки зварюваної заготовки. При цьому зварювальні ванни розташовуються на деякій відстані одна від одної. Таке розщеплення пучка дозволяє виконувати ЕПЗ у різних варіаціях: зварювання відразу в кількох оброблюваних зонах з утворенням декількох зварювальних ванн, що йдуть одна за одною, поєднання зварювання та термообробки. Але при такій схемі процесу ЕПЗ з утворенням кількох зварювальних ванн, що переміщуються послідовно одна за другою, є велика вірогідність утворення інтерметалідів у металі шва і у зоні термічного впливу, які негативно впливають на експлуатаційні характеристики ЗЗ [1].

Також відомо, що для зменшення інтенсивності утворення пор та уникнення створення тріщин перед зварюванням алюмінієвих сплавів виконують попередню термообробку всього виробу безпосередньо електронним пучком, або, в залежності від габаритів виробу, тільки зону зварювання до температури $T_1 = 180...200$ °С. Це дозволяє виключити утворення тріщин, несплавлення крайків, порожнин у ЗТВ, МШ та корені шва за рахунок часткової дегазації роз-

чиненого водню на поверхні крайків основного металу (ОМ), а також підвищити пластичність металу перед зварюванням (рис. 1, *б*). Операція попередньої термообробки металів провадиться несфокусованим сканувальним електронним пучком малої щільності, а потім виконується зварювання з гострим сфокусованим пучком.

Але, як показали результати досліджень, для керування процесом кристалізації металу і більш інтенсивного спливання бульбашок з газом або з парами металу, необхідно також здійснювати термообробку і після зварювання.

Враховуючи ці обставини, було запропоновано однопрохідний процес з однією зварювальною ванною і попередньою та наступною термообробкою шва, з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою електронного пучка з програмованою тепловою інтенсивністю в кожній зоні технологічного процесу [8].

Були проведені технологічні експерименти зі зварювання зразків із алюмінієвих сплавів запропонованим способом. На початковій стадії досліджень зварювання зразків із сплавів А1570 і АМг6 виконували електронним пучком без сканування по заданій траєкторії. На рис. 2 показано пори на окремих ділянках зварних з'єднань, отриманих цим способом. Підвищену пористість у швах можна пояснити тим, що у глибокому парогазовому каналі бульбашки не встигають вийти на поверхню розплавленого металу, а масообмін розплавленого металу сприяє переміщенню їх у хвостову частину ванни, яка вже кристалізується, де і відбувається їхня фіксація у вигляді пор у металі шва (МШ), в зоні часткового оплавлення на кордоні з лінією сплавлення, а також в корені шва. У процесі подальшого виконання технологічних робіт було застосовано традиційний спосіб дегазації зварювальної ванни перемішуванням розплавленого металу безперервним одностороннім скануванням електронного пучка з круговою розгорткою діаметром 2 мм і частотою 180 Гц. Але, як показали результати, цей спосіб також не завжди сприяє повній дегазації зварювальної ванни, особливо при зварюванні алюмінієвих сплавів середніх і великих товщин [10].

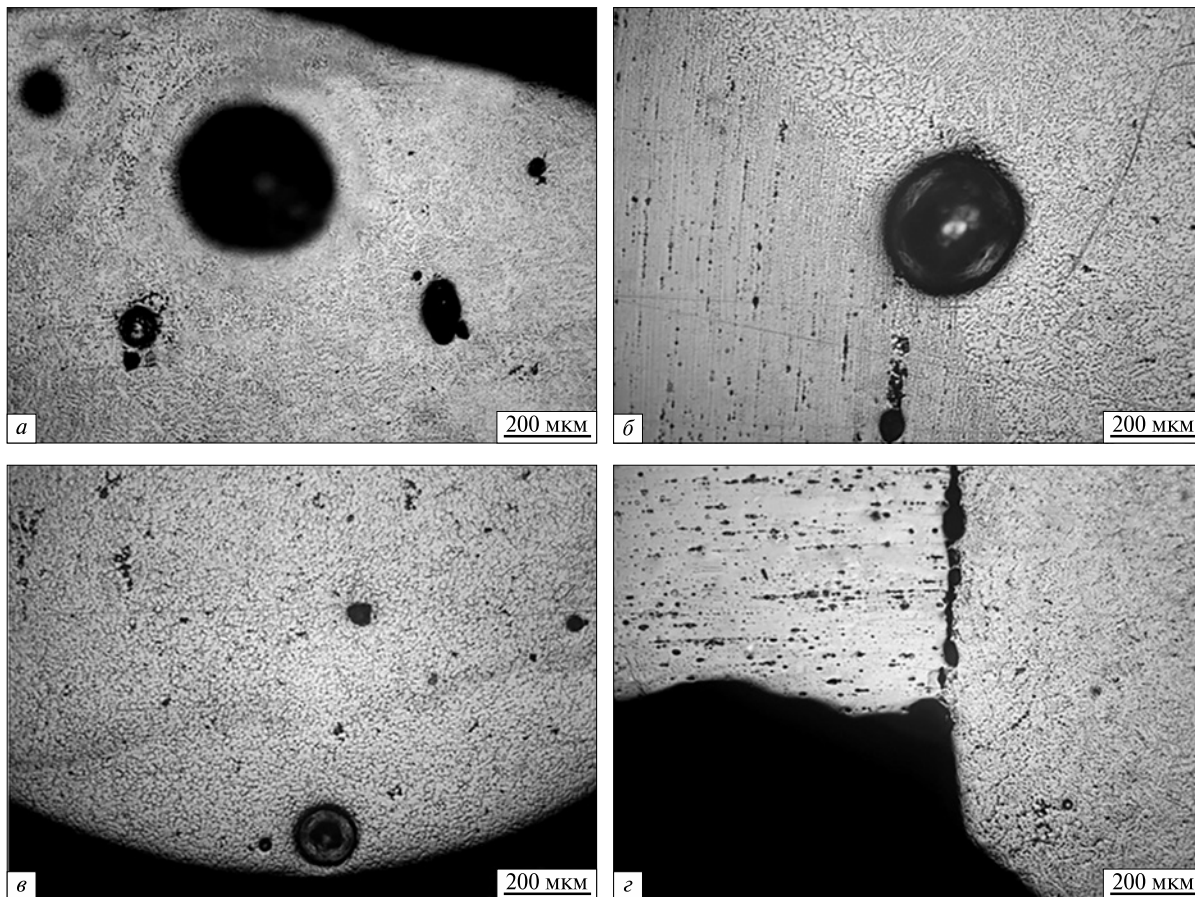


Рис. 2. Мікроструктури ділянок зварних стикових з'єднань, отриманих електронно-променевим зварюванням без сканування електронним пучком стикових зразків із сплавів А1570 (*а, б, в*) і АМг6 (*г*) товщиною відповідно 8 і 6 мм: *а* — права верхня частина металу шва, *б* — кордон лінії сплавлення з основним металом, *в* — корінь шва, *г* — несплавлення крайків у лівій частині кореня шва

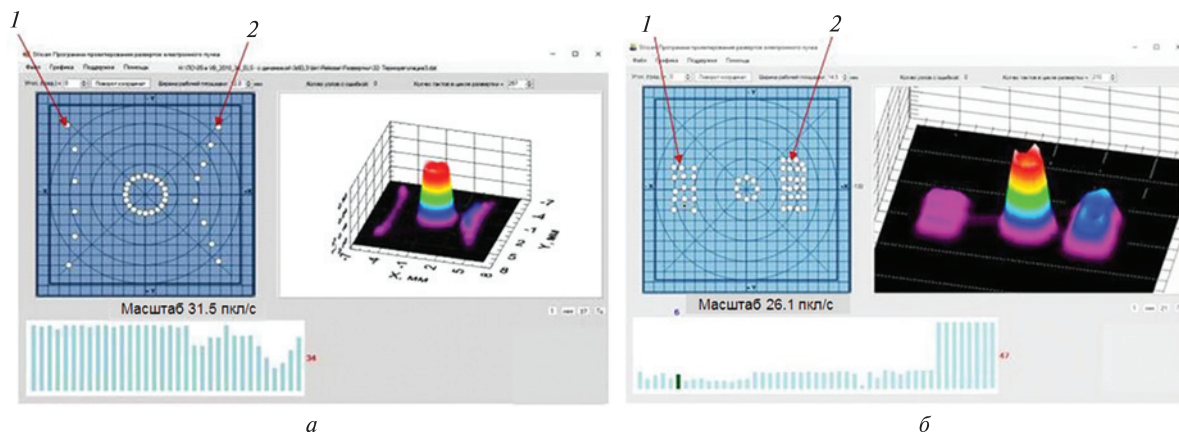


Рис. 3. Варіанти розгортки: *а* — з попередньою та подальшою термічною обробкою шва (*1* — попередня термічна обробка, *2* — подальша термічна обробка); *б* — з попереднім підігрівом та наступною термообробкою з різними тепловими впливами щодо дії амплітуди (*1* — попередній підігрів, *2* — наступна термообробка)

Для дослідження запропонованого способу було проведено моделювання з використанням процесів термообробки зі зварюванням за один прохід, який здійснюється розщепленням електронного пучка на необхідну кількість зон впливу (дві або три) при великій частоті сканування, що дозволяє електронному пучку впливати на різні зони та виконувати інтенсивне переміщення у шві (рис. 3, а). Це буде сприяти спливанню бульбашок із середини МШ на його поверхню та залишати її зовсім. Також було запропоновано побудувати періодичний розподіл інтенсивності підігріву перед зварним швом і за електронним пучком таким чином, щоб зменшити швидкість охолодження. Схему процесу зварювання, під час якого відбувається зміна фокуса пучка синхронно з відхиленням, показано на рис. 3, а.

При цьому було використано систему проектування SVscan, завдяки якій можна створити рисунок траєкторії (апроксимувати) розгортки з використанням різної кількості точок (з можливістю їхнього розширення), що дозволяє системі періодичного відхилення електронного пучка реалізувати частоту сканування від 100 до 1000 Гц. У цієї системи є можливість оцінювати інтенсивність нагрівання у будь-якій точці поверхні та переглядати в 3D-зображенні остаточний розподіл щільності потужності електронного пучка в зоні нагрівання в динаміці при зміні частоти сканування. Така система значно полегшує проектування розгортки електронного пучка. На рис. 3, б представлено варіант розгортки з попередньою та подальшою термічною обробкою шва.

Як показали результати моделювання і попередні експерименти, найбільш оптимальним є варіанти розгортки з попереднім і подальшим підігрівом та різним тепловим впливом по траєкторії розгортки. Було випробувано 47 «вузлів» з частотою розгортки 180 Гц. При цьому діаметр реверсної кругової зварної розгортки становить 2 мм, а діаметр сфокусованої плями електронного пучка — 0.8 мм. Відносна швидкість переміщення зони нагріву дорівнює 0.4 м/хв. Цей варіант розгортки з попереднім підігрівом та наступною термообробкою з різними тепловими

впливами відносно дії амплітуди зварювального пучка представлено на рис. 3, б.

Таким чином, були розроблені варіанти розгортки для відпрацювання елементів технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів з перемішуванням зварної ванни сканувальним пучком і запрограмованою періодичною інтенсивністю теплової дії, яка дозволяє керувати електронним пучком з різною інтенсивністю нагріву. За допомогою електронного променя заданої потужності здійснювалося попереднє і подальше підігрівання зразка. У процесі зварювання за спеціальною програмою промінь розгортався до необхідної конфігурації в одному та другому напрямку. Він сканував вздовж всього шва і виконував зварювання з перемішуванням розплавленої ванни реверсною круговою розгорткою діаметром 2 мм. Хвостова частина ванни при цьому підігрівалась впродовж всього процесу зварювання. Бульбашки, які утворювалися у хвостовій частині, встигали вийти на поверхню і залишити її. Особливо важливо, що при цьому значення струму фокусування залишалося незмінним при відхиленні пучка в режимах попередньої і наступної термообробки.

Поєднання зварного процесу, попередньої та наступної термообробки призводить до збільшення часу циклу роботи розгортки та зменшення частоти сканування електронного пучка, що необхідно враховувати при проектуванні розгортки.

Для технологічних випробувань використовувалися зразки стикових з'єднань з відборткуванням крайків із алюмінієвих сплавів АМг6, А1570 і 1201, які застосовуються як основний конструкційний матеріал космічної техніки [4].

Технологічні роботи виконували у вакуумному стенді ОБ1469м, в якому були змонтовані маніпулятор з електронно-променевою гарматою ПЛ104 [12], зварювальний мідний стіл зі зразками і охолоджувана мідна мішень для оптимізації режимів зварювання. Живлення електронно-променевої гармати здійснювалося від лабораторного джерела ІУН-5 з прискореною напругою 10 кВ. Зварювання зразків виконувалося зі скануванням електронного пучка по реверсній круговій траєкторії, а також з відхиленнями пуч-

ка для попередньої і подальшої термообробок при швидкості 25 м/год. Режими зварювання, розподіл інтенсивності нагріву і отримані макрошліфи приведено в табл. 1.

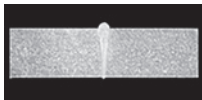






Зварювання виконувалося пучком без сканування (зразок 1), за допомогою традиційного безперервного сканування (зразок 2), а також за допомогою періодичного відхилення пучка з попереднім та наступним підігрівом несфокусованим пучком і з гострим сфокусованим зварювальним пучком, який сканував по реверсній круглій траєкторії діаметром 2 мм з частотою 180 Гц (табл. 1, зразки 3...7). Зовнішній вигляд отриманих зварних з'єднань показано на рис. 4.

Верифікацію якості отриманих з'єднань здійснювали візуальним і рентгенівським контролем, механічними випробуваннями, визначенням елементного складу ОМ та МШ, а також металографічними дослідженнями зварних з'єд-

нань, отриманих запропонованим способом. При ретельному візуальному огляді зварених зразків було оцінено їхнє проплавлення, а також якість зовнішнього вигляду швів з лицевого та зворотного боків. Аналіз огляду зварних зразків показав, що найякіснішими є стикові з'єднання, отримані з використанням періодичного відхилення пучка з реверсною круговою розгорткою і попередньою та повторною термообробкою (рис. 4). Для вивчення геометрії проплавлень, отриманих цим способом зварювання, були виготовлені макрошліфи, показані в табл. 1.

Рентгенівський контроль зварних з'єднань провадився на з'єднаннях із сплавів АМг6, А1570 та 1201, показаних на рис. 5. Контроль здійснювався з метою виявлення прихованих дефектів у з'єднаннях по всій довжині (пори, раковини, тріщини, непровари тощо) і виконувався на рентгенівському апараті РАП-150/300 (фокус

Таблиця 1. Режими зварювання зразків із алюмінієвих сплавів АМг6, А1570 та 1201 (товщина d , струм I , струм фокусування $I_{\text{фок}}$, доля затрачених потужностей на попереднє нагрівання, зварювання і наступне нагрівання $P_{\text{поп}}$, $P_{\text{звар}}$, $P_{\text{наст}}$, амплітуда a , частота f)

№	Сплав	d , мм	Режими зварювання			a , мм	f , Гц	Макрошліфи
			I , мА	$I_{\text{фок}}$, мА	$P_{\text{поп}}/P_{\text{звар}}/P_{\text{наст}}$, %			
1	Амг 6, без сканування	6	135	262	—	—	—	
2	Амг 6, безперервне сканування	6	145	268	—	2	180	
3	Амг 6, періодичне відхилення	6	170	278	25/65/10	2	180	
4	-“-	4	155	252	15/70/15	2	180	
5	-“-	2	125	248	15/75/10	2	180	
6	А1570	8	185	282	25/70/5	- “ -	160	
7	1201	5	185	282	25/70/5	1.5	160	

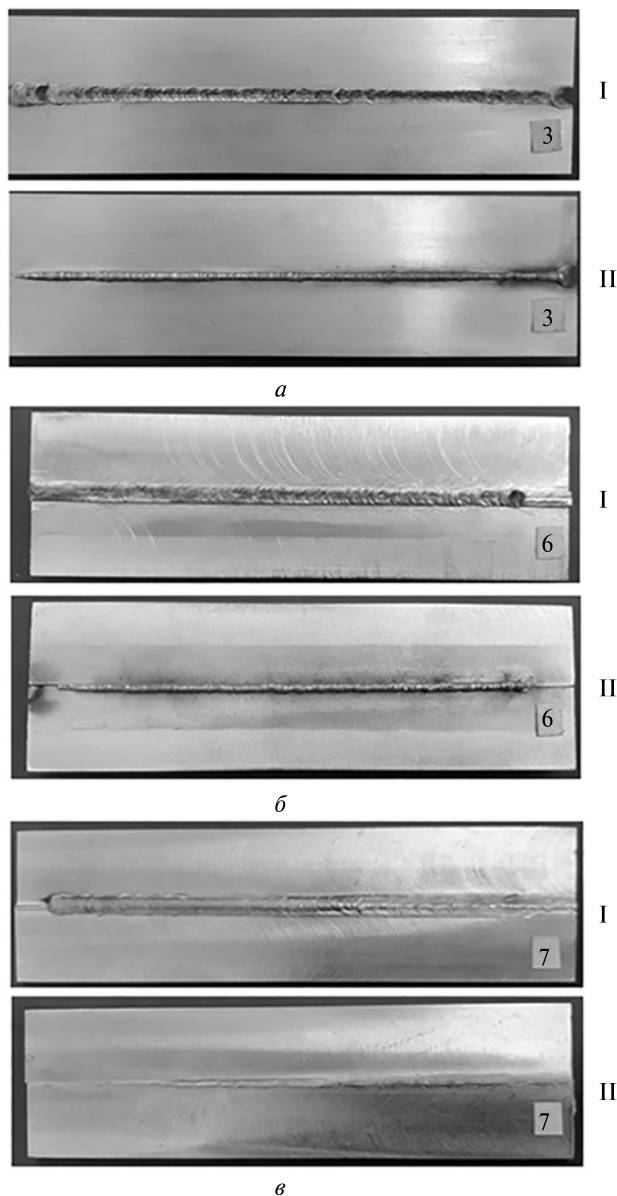


Рис. 4. Зовнішній вигляд зразків алюмінієвих сплавів з відборткуванням і наскрізним проплавленням: *a* — сплав АМг6 товщиною 6 мм, *б* — сплав А1570 товщиною 8 мм, *в* — сплав 1201 товщиною 5 мм (I — лицевий бік, II — зворотний бік)

1.2 мм, $F = 1.0$ м, $U = 100$ кВ, $I = 8.0$ мА, плівка РТ-5). Чутливість методу контролю становила 0.05 мм. Обробка результатів контролю провадилася за допомогою спеціального пристрою до комп'ютера і фіксувалася у вигляді позитивних зображень. Зварні з'єднання, отримані елек-

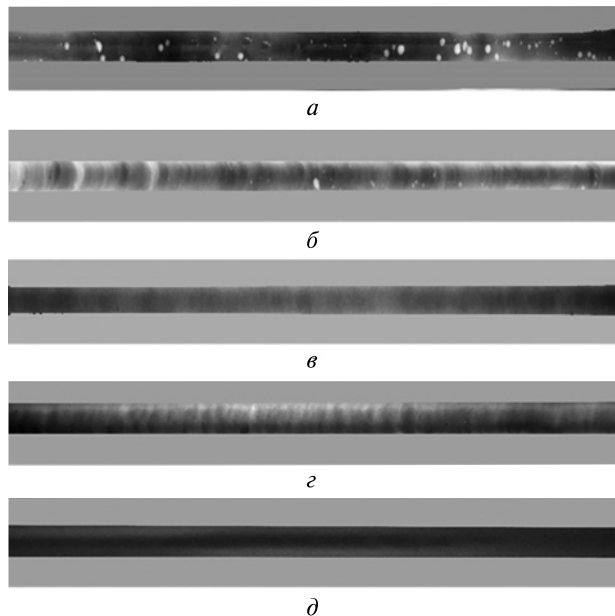


Рис. 5. Рентгенівські зображення стикових зварних з'єднань, отриманих електронно-променевим зварюванням: *a* — сплав АМг6 товщиною 6 мм (без сканування), *б* — сплав АМг6 товщиною 6 мм (з неперервним скануванням круговою розгорткою), *в* — сплав АМг6 товщиною 6 мм (з періодичним відхиленням), *г* — сплав А1570 товщиною 8 мм (з періодичним відхиленням), *д* — сплав 1201 товщиною 5 мм (з періодичним відхиленням)

Таблиця 2. Значення міцності розриву σ_B (інтервали та середні) і коефіцієнта міцності n зварних зразків із алюмінієвих сплавів АМг6, А1570 та 1201, отриманих ЕПЗ з періодичним відхиленням

Сплав	d , мм	σ_B , МПа		n
		зварні з'єднання	основний метал	
АМг6	6	304...310 (306)	335...340 (338)	0.9
А1570	8	330...342 (338)	362...374 (368)	0.91
1201	5	368...377 (370)	413...424 (417)	0.89

тронним пучком без сканування (рис. 5, *a*) і неперервним скануванням з круговою односторонньою розгорткою (рис. 5, *б*), показали наявність пор розміром від 0.3 до 1.0 мм. А у з'єднаннях, отриманих з періодичним відхиленням, внутрішні дефекти не виявлено (рис. 5, *в*, *д*).

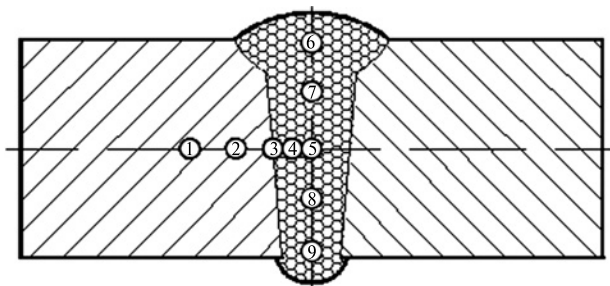


Рис. 6. Точкові визначення елементного складу зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ з періодичним відхиленням електронного пучка: 1 — основний метал, 2 — зона термічного впливу, 3 — лінія сплавлення, 4 — метал шва в середній частині на межі з лінією сплавлення, 5 — метал шва в центральній частині, 6 — метал шва в середній верхній частині шва, 7 — метал шва по осі шва між точками 5 і 6, 8 — метал шва по осі шва між точками 5 і 9, 9 — метал в кореневій частині шва

Таблиця 3. Елементний склад зварного з'єднання із різних сплавів, отриманих ЕПЗ з періодичним відхиленням

Номер спектру	Елементний склад, %							
	Cu	Mg	Al	Si	Sc	Mn	Fe	Zr
Сплав А1570, товщина 8 мм								
S1	—	6.91	92.55	—	0.13	0.12	0.18	0.11
S3	—	6.98	92.35	—	0.19	0.17	0.21	0.10
S4	—	6.84	92.46	—	0.19	0.18	0.21	0.12
S5	—	6.93	92.46	—	0.12	0.14	0.19	0.16
S6	—	6.72	92.50	—	0.23	0.16	0.20	0.19
S9	—	6.78	92.63	—	0.13	0.13	0.19	0.14
Сплав АМг6, товщина 6 мм								
S1	—	6.79	92.25	0.22	—	0.52	0.22	—
S3	—	6.88	92.35	0.09	—	0.48	0.20	—
S3	—	6.84	92.08	0.19	—	0.68	0.21	—
S4	—	6.89	92.77	0.10	—	0.00	0.24	—
S5	—	6.64	92.53	0.23	—	0.60	0.00	—
S6	—	6.78	93.09	0.13	—	0.00	0.00	—
S7	—	6.73	93.08	0.18	—	0.01	0.00	—
S8	—	6.72	92.41	0.19	—	0.68	0.00	—
S9	—	6.68	92.34	0.13	—	0.65	0.20	—
Сплав 1201, товщина 6 мм								
S1	7.59	—	91.99	0.13	—	0.29	0.00	—
S3	7.95	—	91.36	0.20	—	0.32	0.16	—
S4	7.14	—	92.18	0.05	—	0.35	0.27	—
S5	6.79	—	92.59	0.11	—	0.38	0.13	—
S6	7.05	—	92.36	0.10	—	0.29	0.20	—
S9	6.75	—	92.51	0.14	—	0.37	0.22	—

Результати механічних випробувань 33, отриманих періодичним відхиленням для всіх сплавів, свідчать про те, що всі вони мають високу стабільність показників тимчасового опору та високі показники коефіцієнтів міцності (табл. 2). Визначення локального елементного складу 33

із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ, проводилися за допомогою растрового електронного мікроскопа Tescan Mira3 LMU. Оцінка локального елементного складу виконувалась детектором ЕДС Oxford X-max 80 mm, встановленим на растровому електронному мікроскопі. Точки

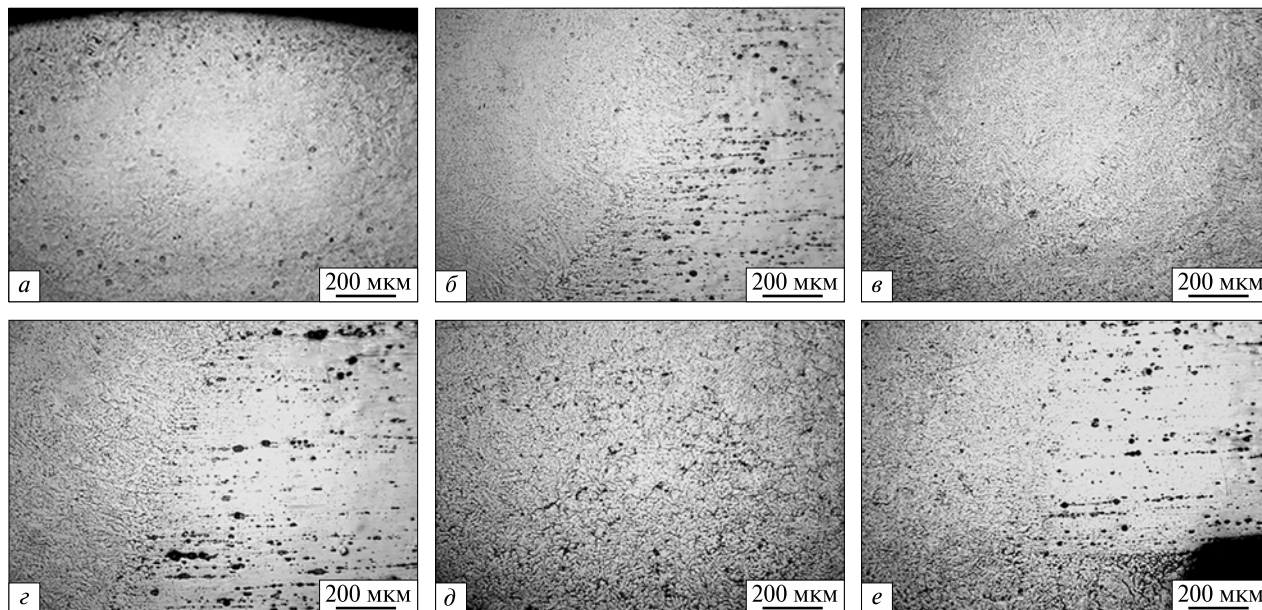


Рис. 7. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву АМг6 товщиною 6 мм, отриманого електронно-променевим зварюванням з періодичним відхиленням: *a* — метал шва у верхній частині, *б* — зона сплавлення метал шва з основним металом у верхній частині, *в* — метал шва в центральній частині, *г* — зона сплавлення метал шва з основним металом в середній частині, *д* — метал шва в кореневій частині, *е* — зона сплавлення метал шва в кореневій частині з основним металом

локального визначення елементного складу показані на рис. 6, а їхні чисельні значення приведені в табл. 3.

Аналіз елементного складу в ЗЗ, отриманих ЕПЗ з періодичним відхиленням, показав рівномірний розподіл всіх елементів від основного металу до метал шва, за виключення складу легкого елементу магнію у сплавах АМг6 і А1570, який в середній частині метал шва виявився зниженим приблизно на 0.25 %. Зниження на 0.25 % магнію не вплинуло на механічні властивості зварних з'єднань.

Металографічні дослідження макро- та мікроструктур виконували на поперечних шліфах. Для виявлення макроструктури ЗЗ Al-Mg-систем легування застосовували хімічне травлення в розчині кислот: $0.5 \text{ см}^3 \text{ HF} + 1.5 \text{ см}^3 \text{ HCl} + 2.5 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3 + 95.5 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$. Для системи Al-Cu використовували послідовне травлення спочатку в 10 % водному розчині NaOH, потім у 30 % водному розчині HNO_3 . Дослідження виконували візуально при збільшенні до $\times 5$ для виявлення великих дефектів. Макроструктури ЗЗ показано у табл. 1.

Дослідження особливостей мікроструктури здійснювали на поперечних підготовлених зразках ЗЗ, що включали ділянки основного металу, ЗТВ і метал шва, за допомогою оптичного мікроскопа ММТ-1600В з цифровою камерою Webbers MUscore 300M. Виявлення мікроструктури ЗЗ відбувалося у процесі електролітичного полірування в реактиві такого складу: $930 \text{ см}^3 \text{ CH}_3\text{COOH}$, $70 \text{ см}^3 \text{ HClO}_4$. Час полірування становив 5...10 с при напрузі 100 В. Виявлені мікроструктури ЗЗ показано на рис. 7—9.

На рис. 7 представлено виявлені мікроструктури ЗЗ сплаву АМг6, отримані ЕПЗ з періодичним відхиленням. Видно, що в основному металі спостерігається явно виражена стрічкова текстура прокатування. Зварювання відбувалося поперек напрямку прокатування. Структура литого метал шва дендритна. У цілому метал шва щільний, але в корені шва спостерігається невелика кількість евтектичних включень. Пористість у металі шва практично відсутня. Поодинокі пори, що спостерігаються у металі шва, не перевищують 30 мкм у діаметрі. Також спо-

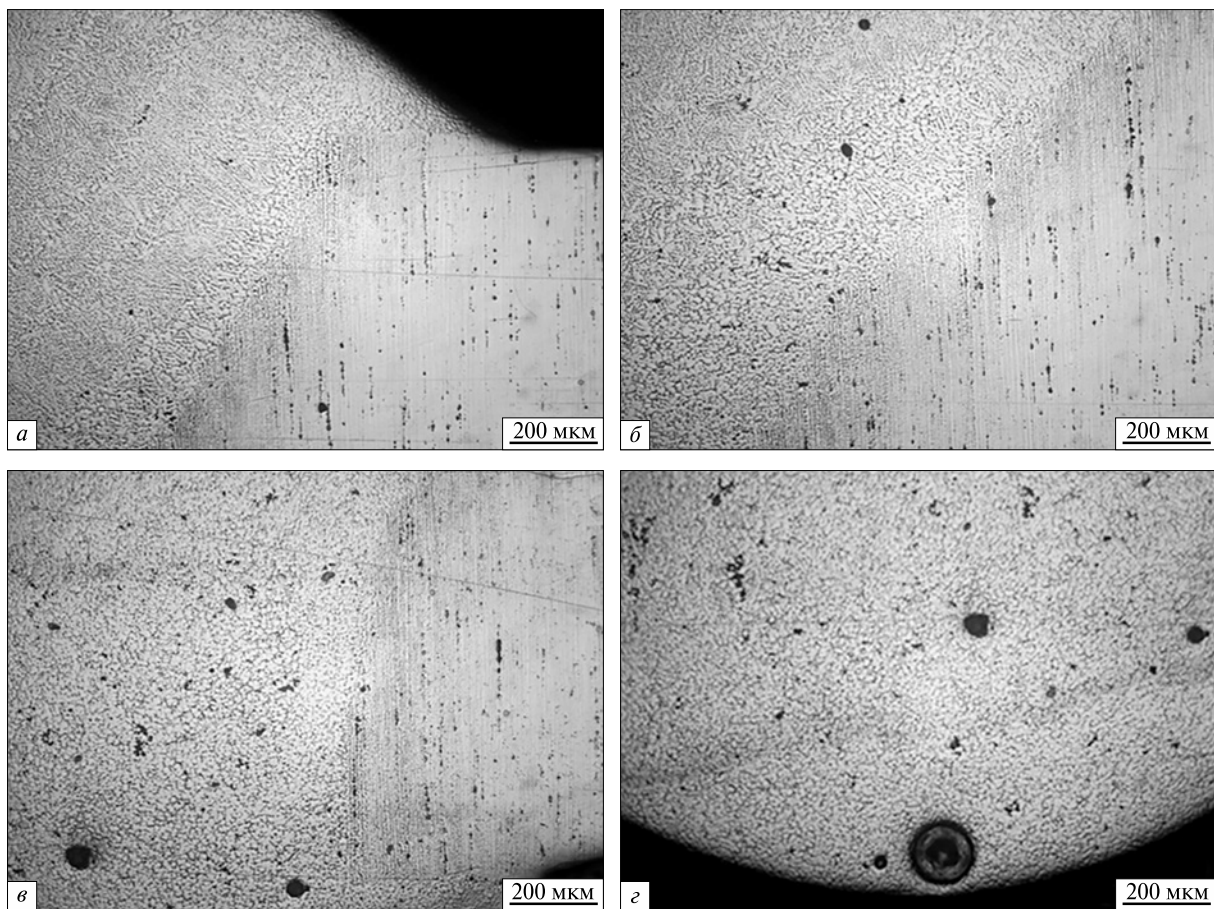


Рис. 8. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву А1570 товщиною 8 мм, отриманого електронно-променевим зварюванням з періодичним відхиленням: *а* — зона сплавлення металу шва з основним металом (верхня частина), *б* — зона сплавлення металу шва з основним металом (середня частина), *в* — зона сплавлення металу шва з основним металом (нижня частина), *г* — корінь шва

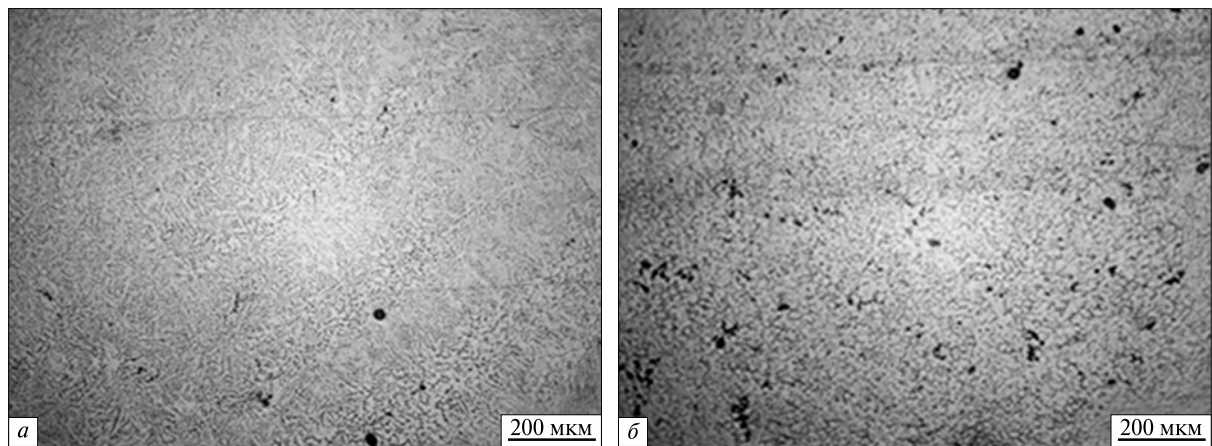


Рис. 9. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання сплаву 1570, отриманого електронно-променевим зварюванням з періодичним відхиленням: *а* — дендритна структура, *б* — субдендритна структура

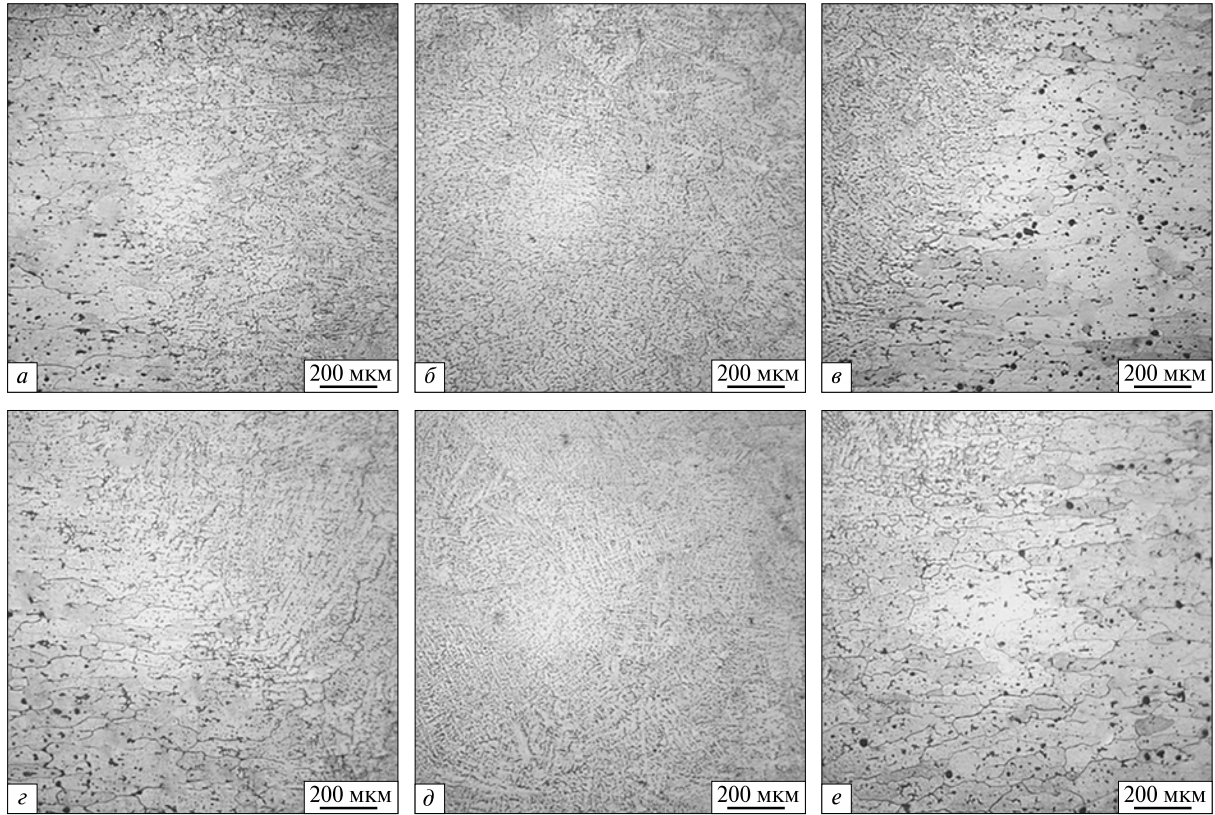


Рис. 10. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву 1201 товщиною 5 мм, отриманого електронно-променевою зваркою з періодичним відхиленням: *a* — зона сплавлення металу шва з основним металом (верхня частина зліва), *б* — основний метал (верхня частина посередині), *в* — зона сплавлення металу шва з основним металом (верхня частина справа), *г* — зона сплавлення металу шва з основним металом (нижня частина зліва), *д* — основний метал (нижня частина посередині), *е* — зона сплавлення металу шва з основним металом (нижня частина справа)

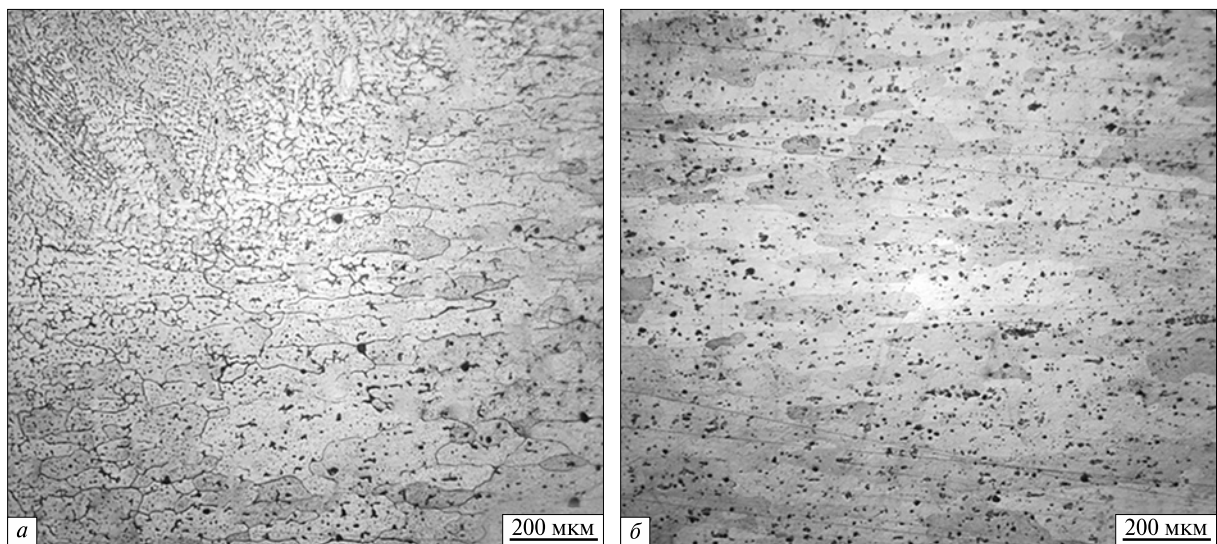


Рис. 11. Мікроструктура зони сплавлення та термічного впливу (*a*) і основного металу (*б*)

стерігаються окремі пори розміром до 100 мкм в зоні лінії сплавлення. Відповідно до стандартів ці дефекти допустимі.

На рис. 8 показано виявлені мікроструктури 33 сплаву А1570, отриманого ЕПЗ з періодичним відхиленням. Структура основного металу свідчить, що зварювання виконували вздовж напрямку прокатування. По шву спостерігаються окремі пори, переважно у нижній частині шва. Розмір пор не перевищує 100 мкм (рис. 8, *г*).

Структура металу шва переважно дендритна (рис. 9, *а*). Але, скандій, наявний у сплаві, призводить до формування у певних ділянках шва сплаву 1570 субдендритної структури (рис. 9, *б*). Ознак рекристалізації основного металу в ЗТВ не помічено.

На рис. 10 показано виявлені мікроструктури 33 сплаву 1201. Щільна структура металу шва спостерігається в основному об'ємі. Структура шва дендритна, дендритний параметр по висоті шва суттєво не змінюється. Тобто, структура металу шва стабільна по об'єму. Спостерігаються одиничні пори в корені шва розміром до 100 мкм. У зоні сплавлення та термічного впливу наявні дрібні пори розміром до 40 мкм. Пори спостерігаються на глибину до 1000 мкм від лінії сплавлення у зварюваний метал. Така картина характерна для всіх 33 сплаву 1201, отриманих зварюванням плавленням, незалежно від способу. Крім того, у ЗТВ безпосередньо біля лінії сплавлення спостерігається часткове оплавлення металу з характерним ростом міжзеренних прошарків (рис. 11, *а*). Ближче до основного металу спостерігається явна рекристалізація металу (рис. 11, *б*). Дефектів у вигляді тріщин не виявлено.

Результати металографічних досліджень 33 сплавів АМг6, А1570 і 1201, отриманих періо-

дичним способом відхилення, показали, що структура металу всіх швів дендритна. У цілому метал шва 33 щільний, пористість у металі шва практично відсутня. Поодинокі пори, що спостерігаються у металі шва, не перевищують 30 мкм в діаметрі. Також спостерігаються окремі пори розміром до 100 мкм в зоні лінії сплавлення. Згідно із стандартами ці дефекти допустимі.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновані варіанти розподілу потужностей теплової дії електронного пучка дозволяють синтезувати управління електронним пучком для створення заданого температурного поля при ЕПЗ з одночасним попереднім підігрівом і подальшою термообробкою.

2. Розроблені елементи технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів однопрохідним способом з попереднім підігрівом та наступною термообробкою шва з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою і періодичним відхиленням електронного пучка надають нові можливості для створення конструкцій в умовах поверхні Місяця.

3. Випробування механічних властивостей, металографічні дослідження і елементний склад 33 показали високу якість з'єднань, отриманих способом періодичного відхилення пучка при зварюванні з попереднім підігрівом та подальшою термообробкою.

Результати досліджень, використані для створення цієї статті, були отримані в рамках Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр. Ці результати можуть бути використані при будівництві та експлуатації стаціонарних споруд і обладнання на поверхні Місяця в рамках програми «Артеміда».

ЛІТЕРАТУРА

1. Башенко В. В., Вихман В. Б. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки. Технологии и оборудование электронно-лучевой сварки: Матер. I С.-Петер. Междунар. науч.-техн. конф. (19—22 мая 2008 г.). СПб.: ВиТ-Принт, 2008. С. 5—21.
2. Бондарев А. А., Рабкин Д. А. Испарение легколетучих элементов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов. *Автомат. сварка*. 1974. № 3 (252). С. 13—16.
3. Бондарев А. А., Терновой Е. Г. Особенности формирования швов и свойства соединений алюминиевых и магниевых сплавов в условиях, имитирующих космические. *Автомат. сварка*. 2010. № 11. С. 22—27.
4. Ищенко А. Я., Лабур Т. М. *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев: Наук. думка, 2013. 414 с.

5. Ольшанская Т. В., Саломатова Е. С. Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке. *Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2016. **18**, № 4.
6. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. *Сварка и родственные технологии в космосе*. Киев, Наук. думка, 1998. 183 с.
7. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов*. Киев: Наук. думка, 1986. 256 с.
8. Соловійов В. Г., Ланкін Ю. М., Романова І. Ю. Програмування розгортки електронного пучка для зварювання з термообробкою. *Автомат. зварювання*. 2022. № 4. С. 1–7.
9. Терновий Є. Г., Патон Б. Є., Лобанов Л. М., Асніс Ю. А., Зубченко Ю. В., Статкевич І. І. Комплекс апаратури для електронно-променевого зварювання в умовах поверхні Місяця. *7-ма Міжнар. конф. «Космічні технології: сучасне і майбутнє»*: тези доп. Дніпро, 2019. С. 113.
10. Терновой Е. Г., Лобанов Л. М. Особенности электронно-лучевой сварки толстостенных оболочек из алюминиевых сплавов. 7-я Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: тез. докл. Днепр, 2019. С. 93.
11. Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Yu. A., Ternovyi Y. H., Zubchenko Yu. V. (2017). Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Materials and Technologies*. **23**(4). P. 27–32.
12. Paton B. E., Lobanov L. M., Naidich Yu. V., Asnis Yu. A., Zubchenko Yu. V., Ternovyi E. G., Volkov V. S., Kostyuk B. D., Umanskii V. P. (2018). New electron beam gun for welding in space. *Science and Technology of Welding and Joining*. **20**. 1–7.

REFERENCES

1. Bashenko V. V., Vikhman V. B. (2008). The state and prospects of the development of electronically. Raming welding. Technologies and equipment of electron-beam welding. *Materials I S.-Petersb. Int. Scientific and Technology, Off.*, May 19–22, 2008. St. Petersburg: Vit-Print, 5–21 [in Russian].
2. Bondarev A. A., Rabkin D. A. (1974). Evaporation of easily fluent elements during electron-beam welding of aluminum alloys. *Automatic welding*, № 3 (252), 13–16 [in Russian].
3. Bondarev A. A., Ternovoy E. G. (2010). Features of the formation of seams and properties of joints of aluminum and magnesium alloys under conditions simulating space conditions. *Automatic welding*, № 11, 22–27 [in Russian].
4. Ishchenko A. Ya., Labur T. M. (2013). *Welding of modern structures from aluminum alloys*. Kyiv: Naukova Dumka, 414 p. [in Russian].
5. Olshanskaya T. V., Salomatova E. S. (2016). Review of modern methods of electron beam control in electron beam welding. *News PNIP U. Engineering, materials science*, **18**, № 4.
6. Paton B. E., Lapchinsky V. F. (1998). *Welding and related technologies in space. Peculiarities and Prospects*. Kyiv. Naukova dumka, 182 p. [in Russian].
7. Rabkin D. M. (1986). *Metallurgy of fusion welding of aluminum and its alloys*. Kyiv: Naukova Dumka, 256 p. [in Russian].
8. Solovyov V. G., Lankin Yu. M., Romanova I. Y. u. (2022). Sweep programming electronic beam for heat treatment welding. *Automatic welding*, № 4, 1–7.
9. Ternovyi Y. G., Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Y. A., Zubchenko Yu. V., Statkevych I. I. (2019). Complex of equipment for electron-beam welding in Moon surface conditions. *7 Int. conf. "Space technologies: present and future"*: Abstracts reports. Dnipro, 113 [in Ukrainian].
10. Ternovyi Y. G., Lobanov L. M. (2019). Features of electron-beam welding of thick-walled shells made of aluminium alloys. *7 Int. conf. "Space technologies: present and future"*: Abstracts reports. Dnipro, 93 [in Russian].
11. Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Yu. A., Ternovyi Y. H., Zubchenko Yu. V. (2017). Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Materials and Technologies*, **23**(4), 27–32 [in Ukrainian].
12. Paton B. E., Lobanov L. M., Naidich Yu. V., Asnis Yu. A., Zubchenko Yu. V., Ternovyi E. G., Volkov V. S., Kostyuk B. D., Umanskii V. P. (2018). New electron beam gun for welding in space. *Science and Technology of Welding and Joining*, **20**, 1–7.

Стаття надійшла до редакції 14.06.2023

Після доопрацювання 14.02.2024

Прийнято до друку 24.02.2024

Received 14.06.2023

Revised 14.02.2024

Accepted 24.02.2024

L. M. Lobanov, Deputy Director, Dr. Techn. Sciences, Prof., Acad. NAS of Ukraine. Honored Worker of Science and Technology of Ukraine (2004), Gold Medal. B. Paton "For outstanding achievements in the creation of innovative scientific and technical developments that have found wide practical use" (2022)

ORCID: 0000-0001-9296-2335

E-mail: office@paton.kiev.ua

Yu. M. Lankin, Doctor of Techn. Sci., Senior Researcher, collaborator

ORCID: 0000-0001-6306-8086

E-mail: lankin.u.n@gmail.com

Y. H. Ternovyi, Deputy Head of Department "Space Technologies"

ORCID: 0000–0002–4323–0944

E-mail: ev-geo@ukr.net

N. V. Piskun, Head Department “Space Technologies”, Dr. Techn. Sci.

ORCID: 0000-0003-1459-2310

E-mail: nadamova54@gmail.com

S. O. Hlushak, Researcher, collaborator

ORCID: 0000-0003-4518-7262

E-mail: electriber@ukr.net

V. G. Solovyov, Senior Researcher, collaborator, Cand. Techn. Sci.

ORCID: 0000-0002-1454-7520

E-mail: hsova@gmail.com

V. F. Semikin, Senior Researcher, Cand. Techn. Sci.

ORCID: 0000-0002-7407-5887

E-mail: semikin@paton.kiev.ua

V. E. Fedorchuk, Senior Researcher, collaborator

ORCID: 0000-0002-9929-3231

E-mail: fedorchuk@paton.kiev.ua

I. I. Statkevych, Researcher, collaborator

ORCID: 0000-0001-9403-2123

E-mail: statkevich_igor@ukr.net

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

11, Kazimir Malevich Str., Kyiv, 03150 Ukraine

ELEMENTS OF TECHNOLOGY OF ELECTRON BEAM WELDING OF ALUMINUM ALLOYS FOR INSTALLATION AND REPAIR AND RESTORATION WORK ON THE SURFACE OF THE MOON

The exploration of the Moon cannot be carried out without the creation of long-term lunar bases (LB), as well as other objects that ensure the livelihoods and work of expeditions. These can be assembly and assembly operations during the creation of space complexes or repair and maintenance work related to ensuring the duration of operation of existing systems. Experiments on automatic welding in space, which were carried out on the “Vulkan” equipment, as well as welding with the manual electron beam tool «URI» in outer space, showed that electron beam welding (EBW) is the optimal technological process for performing welding work in space conditions. In this process, the effective efficiency is 85–90 %, which is the maximum compared to other welding methods. EBW in the conditions of terrestrial gravity allows us to ensure the mechanical and chemical properties of welded joints, as well as their density almost at the level of the base metal of the structure, which is impossible with other welding methods. Thus, the strength coefficient of the weld metal of welded joints from aluminum alloys obtained by EBW is 0.85...0.93, and with arc and plasma-arc methods, it is 0.7...0.8. At the same time, obtaining such properties of welded joints in space conditions is difficult. Of course, reduced gravity, low temperatures, and ultra-high vacuum, which are the natural environment on the lunar surface, contribute to the formation of internal leaks in the form of pores in welds (PW). This is primarily manifested in the welding of aluminum alloys, which are used as the main material in spacecraft structures. To obtain high-quality welded joints and exclude such defects as pores, cracks, and non-fusion of edges in the weld roots to be welded, a system of equipment for periodic deflection of the electron beam with a programmable heating intensity along a given trajectory was developed and manufactured.

As a result of technological work carried out using a complex of equipment with a discrete deviation of the electron beam, welded joints (WJ) were obtained from alloys AMg6, Al570, and 1201 with a thickness of 2 to 8 mm. The obtained PW was subject to visual inspection and X-ray control to determine external and internal defects in the WJ. Also, mechanical tests for the strength of resistance by tearing were carried out, the chemical composition was determined, and metallographic studies of PW obtained by the proposed method were performed. The results of the tests and studies showed the high quality of PP from aluminum alloys obtained by EBW using a discrete deflection of an electron beam with a programmable heating intensity along a given trajectory.

The purpose of this work was to analyze the methods of degassing the molten metal of the weld pool, as well as the development and testing of the elements of the technological process of the EBW of aluminum alloys using the created equipment, which, when performing installation and repair and restoration work on the surface of the moon, will allow us to obtain high-quality WJ that meets the requirements for space designs.

Keywords: long-term lunar bases (LB), ultra-high vacuum, low temperatures, electron beam welding (EBW), aluminum alloys, welded joints, defects in seams, leaks, pores, discrete electron beam deflection, scan, combined focusing, X-ray flaw detection, mechanical properties, spectral analysis, chemical composition, macrostructure, microstructure, base metal, weld metal, thermal exposure zone (ZTE), microhardness.

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.054>
УДК 533.95

В. О. ШУВАЛОВ, зав. відділу, д-р техн. наук, проф. Лауреат Державної премії України.
Лауреат премії ім. М. К. Янгеля Президії НАН України

ORCID: 0000-0002-6640-6041

E-mail: vashuvalov@ukr.net , Shuvalov.V.O@nas.gov.ua

М. І. ПИСЬМЕННИЙ, наук. співроб.

ORCID: 0000-0002-3287-8745

E-mail: pismennnyi.m.i@nas.gov.ua

М. А. ТОКМАК, наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-9525-4545

E-mail: Tokmak.m.a@nas.gov.ua

С. М. КУЛАГІН, старш. наук. співроб., канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

ORCID: 0000-0002-2862-5809

E-mail: Kulahin.S.M@nas.gov.ua

М. П. РІЗНИЧЕНКО, мол. наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-6151-4089

E-mail: Riznychenko.M.P@nas.gov.ua

Інститут технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
вул. Лешко-Попеля 15, Дніпро, Україна, 49005

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛІМЕРІВ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ З АТОМАРНИМ КИСНЕМ НА НИЗЬКИХ НАВКОЛОЗЕМНИХ ОРБІТАХ

Розроблено процедури моделювання взаємодії полімерів — конструкційних матеріалів космічних апаратів — з гіпертепловими потоками атомарного кисню (АК) на дуже низьких орбітах із застосуванням потоків високоенергетичних іонів розрідженої плазми. За результатами стендових і супутникових експериментів (орбітальна станція «Мир», МКС, КА «Spot-1, -2, -4», «Space Shuttle») визначено параметри, які характеризують фізико-хімічну та динамічну взаємодію потоків атомарного кисню з конструкційними полімерами космічних апаратів, такі як коефіцієнти ерозії, поглинання сонячного випромінювання, акомодатії імпульсу і енергії, а також глибина ерозії і шорсткість поверхні полімерної плівки. Отримано залежності параметрів взаємодії в системі «АК — полімер» від енергії і флюенсу іонів АК. Показано, що застосування потоків іонів АК з енергіями 30...100 еВ дозволяє моделювати взаємодію гіпертеплових потоків АК з полімерами на висотах 170...300 км при високих флюенсах АК в атмосфері Землі.

Ключові слова: полімер, флюенс, глибина ерозії, шорсткість, потік атомарного кисню, коефіцієнти передачі імпульсу та енергії.

Цитування: Шувалов В. О., Письменний М. І., Токмак М. А., Кулагін С. М., Різниченко М. П. Моделювання взаємодії полімерів космічних апаратів з атомарним киснем на низьких навколоземних орбітах. *Космічна наука і технологія*. 2024. 30, № 2 (147). С. 54—68. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.054>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Полімери широко використовуються як конструкційні матеріали космічних апаратів (КА): для покриття зовнішніх поверхонь, обшивки сонячних батарей, як компоненти екранно-вакуумної теплоізоляції тощо. Навколосупутникове середовище на висотах 200...700 км є агресивним до полімерів КА. На навколосупутникових орбітах зміна фізичних, хімічних, термооптичних і механічних властивостей матеріалів зумовлена впливом частково іонізованої плазми атомарно-молекулярного кисню. Експозиція полімерних матеріалів на орбітальних станціях МКС, «Мир», КА «Space Shuttle», «Spot-1», «Spot-2», «Spot-4» та ін. [1, 18, 20, 32] показала, що коефіцієнти розпилення матеріалу та глибина ерозії пропорційні флюенсу АК. З'явився термін «поліімідний еквівалентний флюенс АК», як еталон прийнято поліімід картон-Н.

На висотах 200...700 км АК ступінь іонізації змінюється від 10^{-4} до 10^{-1} [16]. Фізико-хімічний вплив АК на полімери в атмосфері Землі характеризують взаємозалежні процеси обміну енергією та зарядом між частками навколишнього середовища і поверхнею матеріалу, зокрема хімічні реакції в адсорбованому і поверхневому шарах. Позитивні іони АК з енергією 5...10 еВ виконують роль радіаційного хімічного активатора поверхні полімерного матеріалу. Природа такого впливу пов'язана з нейтралізацією іонів, що призводить до порушень електронно-дірочних пар у напівпровідниках і діелектриках, які зберігаються досить довго у поверхневому шарі товщиною порядку 10 атомарних моношарів.

Дослідження кінетики процесу взаємодії плазми атомарно-молекулярного кисню з поліімідом картон-Н [16] свідчать про те, що молекулярний кисень інертний, і участі у хімічних реакціях не бере. Визначальним є процес окисної деструкції полімерів за участю АК. Співвідношення швидкостей газовиділення продуктів хімічного травлення CO, CO₂, H₂O і H₂ залишається постійним, і в діапазоні 290...400 К не залежить від температури матеріалу і параметрів плазми: склад частинок, які хімічно взаємодіють із полімерною плівкою, не змінюється. Механізм руйнування полімерів КА пов'язаний, як мінімум, із двома видами впливу: фізичним розпиленням і хімічним трав-

ленням. Наслідком впливу АК на полімер є: розпилення матеріалу, зміна рельєфу, термооптичних і фізико-механічних властивостей поверхні. Зміни рельєфу, ступеня шорсткості поверхні полімеру впливають і на процеси передачі імпульсу та енергії газових компонентів атмосфери Землі матеріалам зовнішніх поверхонь і покриттів КА.

Проблема забезпечення тривалої експлуатації КА безпосередньо пов'язана із проблемою забезпечення стійкості полімерів до впливу потоків АК з енергією порядку 5 еВ в атмосфері Землі. Інформацію про зміну властивостей полімерів КА при тривалій експлуатації в атмосфері Землі можна отримати тільки експериментально — за результатами льотних або стендових випробувань. Одним із шляхів розв'язання задачі прогнозування деградації полімерів КА при впливі АК в атмосфері Землі є фізичне моделювання або імітація взаємодії потоків АК з полімерними матеріалами на спеціалізованих стендах. При розробці захисних покриттів, які зміцнюють полімери КА, при тестуванні і відборі максимально стійких до впливу гіпертеплових потоків АК полімерів (в яких енергія спрямованого руху часток перевершує теплову складову енергії; для атомарного кисню в атмосфері Землі теплова енергія становить 0.12 еВ, енергія спрямованого руху атомарного кисню відносно космічних апаратів — 4.5 еВ) як еталонний матеріал використовується поліімід картон-Н та його аналоги. Точність інтерпретації льотних і стендових випробувань полімерів КА значною мірою залежить від повноти інформації про деградацію властивостей еталонного поліімиду при впливі потоків АК, а для умов дуже низьких орбіт (VLEO) — при високих флюенсах АК.

Умовам експлуатації полімерів на висотах 200...700 км при середньому рівні сонячної активності відповідають такі значення параметрів АК [9, 20]:

- енергія напрямленого руху частинок $E_{AK} = 4.7...5.0$ еВ (на круговій орбіті швидкість КА $U_{KA} = 7.5...7.8$ км/с);
- теплова енергія атомів кисню 0.12 еВ;
- концентрація атомів $N_{AK} = 10^6...4 \cdot 10^9$ см⁻³;
- потік частинок $\Phi_{AK} = N_{AK} \times U_{KA} = 8 \cdot 10^{11}...3 \cdot 10^{15}$ атомівО/(см²с);

• флюенс $F_{AK} = N_{AK} \cdot U_{KA} \cdot t = 2.5 \cdot 10^{19} \dots 9 \cdot 10^{22}$ атомівО/см² ($t = 1$ рік — час експлуатації КА).

На спеціалізованих стендах генератори АК (лазерна детонація, електронно-циклотронний резонанс, високочастотний розряд тощо) синтезують імпульсні і стаціонарні потоки атомів з енергією частинок $E_{AK} = 5 \dots 10$ еВ і $\Phi_{AK} = 10^{15} \dots 10^{16}$ атомівО/(см²с) [14, 22, 26, 30]. Натурні дослідження [1, 10, 12, 15, 18, 20, 32] показали, що хімічна деструкція полімерів триває протягом усього часу перебування КА на орбіті. Швидкість деградації носить нелінійний характер.

Стендові дослідження деградації полімерів при тривалій взаємодії з АК повинні відповідати часу експлуатації і високим флюенсам АК, наприклад, на дуже низьких орбітах (VLEO) $F_{AK} = 10^{21} \dots 10^{23}$ атомівО/см². Реалізація таких умов в імпульсних і стаціонарних потоках АК при $E_{AK} \approx 5$ еВ на спеціалізованих стендах стикається з ускладненнями. Для розв'язання задачі фізичного моделювання тривалої взаємодії полімерів з АК в атмосфері Землі і прискорення стендових ресурсних випробувань полімерних матеріалів КА автори вивчили особливості застосування режимів опромінювання полімерів потоками плазми атомарно-молекулярного кисню із концентрацією $N_{iAK} = 10^9 \dots 10^{10}$ іонО/см³ при енергіях $E_{iAK} \approx 5$ еВ і потоками плазми з енергією $E_{iAK} = 30 \dots 80$ еВ і $\Phi_{iAK} \geq 10^{16}$ іонО/см²с, а також полііміду kapton-Н як еталонний матеріал.

Опромінювання полііміду kapton-Н високоенергійними іонами АК вимагає дослідження залежності коефіцієнта ерозії полііміду $R_e(E_{iAK})$ від енергії іонів АК, а також внеску кінетичної і хімічної складових впливу іонів АК на руйнування полімеру. Згідно з даними [2, 5] при опроміненні вуглецю і вуглецьвмісних полімерів (наприклад, полііміду kapton-Н $C_{22}H_{10}O_5N_2$ і його аналогів) іонами АК з енергією $E_{iAK} \leq 200$ еВ домінує механізм хімічного травлення, що формує структуру поверхні матеріалу. Цей механізм і визначає вибір відомих і широко застосовуваних параметрів, які характеризують деградацію полімерів КА під впливом АК в атмосфері Землі: глибина ерозії Δx_w , об'ємний коефіцієнт ерозії (реакційна ефективність) R_e і флюенс F_{iAK} .

Застосування полііміду kapton-Н як еталонного матеріалу, в свою чергу, зумовило необхідність визначення більш повного, ніж дотепер, комплексу параметрів, які характеризують деградацію масогабаритних і термооптичних властивостей полііміду, а також параметрів, що характеризують аеродинамічну взаємодію в системі «АК — поліімід», зокрема коефіцієнтів передачі імпульсу та енергії іонів АК поверхні полімеру і їхньої залежності від флюенсу АК, орієнтації елемента поверхні відносно вектора швидкості потоку, що набігає.

2. УМОВИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВАЛОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ КА З ГІПЕРТЕПЛОВИМИ ПОТОКАМИ АТОМАРНОГО КИСНЮ

За критерій еквівалентності при фізичному моделюванні тривалого впливу високошвидкісних потоків АК прийнято умову рівності втрати маси ΔM_w або зміни глибини Δx_w ерозії полімерної плівки при експозиції її в атмосфері Землі та на спеціалізованому стенді:

$$\Delta M_w^{(N)} = \Delta M_w^{(M)} \text{ або } \Delta x_w^{(N)} = \Delta x_w^{(M)}. \quad (1)$$

Тут індекс « N » відповідає натурним умовам в атмосфері Землі, « M » — умовам стендових випробувань, « W » — полімер, який підлягає тестуванню. Через те що $\Delta M_w = \rho_w R_e F_{AK} = \rho_w \Delta x_w$ (ρ_w і R_e — щільність і коефіцієнт ерозії тестованого матеріалу), то з виразу (1) випливає вираз для зв'язку між параметрами, що характеризують умови експлуатації матеріалів у атмосфері Землі, з їхніми значеннями при тестуванні зразка матеріалу на стенді:

$$F_{AK}^{(N)}(E_{AK}^{(N)}) = F_{AK}^{(M)}(E_{iAK}^{(M)}) \cdot R_{ew}(E_{iAK}^{(M)}) / R_{ew}(E_{iAK}^{(N)}), \quad (2)$$

де $E_{AK}^{(N)}$ — енергія АК в атмосфері Землі, $E_{iAK}^{(M)}$ — енергія іонів АК у потоці плазми атомарно-молекулярного кисню на стенді.

З виразу (2) випливають умови для коефіцієнта прискорення випробувань на стенді:

$$K_{\text{прс}} = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = \frac{N_{iAK}^{(M)}}{N_{iAK}^{(N)}} \cdot \left(\frac{E_{iAK}^{(M)}}{E_{iAK}^{(N)}} \right)^{0.5} \cdot \frac{R_{ew}(E_{iAK}^{(M)})}{R_{ew}(E_{iAK}^{(N)})}. \quad (3)$$

При фізичному моделюванні взаємодії в системі «АК — полімер» можна реалізувати два режими випробувань:

1. $E_{iAK}^{(M)} = E_{AK}^{(N)} = 5 \text{ eV}$ і $R_{eW}(E_{iAK}^{(M)}) = R_{eW}(E_{AK}^{(N)})$,
тоді

$$K_{\text{прс}}^{(1)} = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = \frac{N_{iAK}^{(M)}}{N_{AK}^{(N)}} > 1. \quad (4)$$

2. $E_{iAK}^{(M)} > E_{AK}^{(N)}$ і $R_{eW}(E_{iAK}^{(M)}) > R_{eW}(E_{AK}^{(N)})$,
тоді

$$K_{\text{прс}}^{(2)} = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = K_{\text{прс}}^{(1)} \cdot \xi, \quad (5)$$

де

$$\xi = \left(\frac{E_{iAK}^{(M)}}{E_{AK}^{(N)}} \right)^{0.5} \cdot \frac{R_{eW}(E_{iAK}^{(M)})}{R_{eW}(E_{AK}^{(N)})} \gg 1.$$

З виразів (4), (5) випливає $K_{\text{прс}}^{(2)} \gg K_{\text{прс}}^{(1)}$, тобто процес випробувань «прискорюється» пропорційно множнику ξ . При стендових випробуваннях полімерного матеріалу за результатами вимірювань втрати маси $\Delta M_w(E_{iAK}^{(M)})$ і (або) глибини ерозії $\Delta x_w(E_{iAK}^{(M)})$ для відомих значень параметрів, які характеризують умови тестування $F_{iAK}^{(M)}$, $E_{iAK}^{(M)}$, $t^{(M)}$, обчислюється коефіцієнт ерозії полімеру:

$$R_{eW}(E_{iAK}^{(M)}) = \frac{\Delta M_w^{(M)}}{\rho_w F_{iAK}^{(M)}} = \frac{\Delta x_w}{F_{iAK}^{(M)}}. \quad (6)$$

Для оцінки значень параметрів $F_{AK}(E_{AK}^{(N)})$ і $R_{ek}(E_{AK}^{(N)})$, що характеризують умови експлуатації матеріалу в атмосфері, використовується поліілід картоп-Н як еталонний матеріал. З відношення $\Delta M_w / \Delta M_k = \rho_w R_{eW} F_w / \rho_k R_{ek} F_k = \rho_w \Delta x_w / \rho_k \Delta x_k$ випливає

$$R_{eW}(E_{iAK}^{(M)}) = R_{ek}(E_{iAK}^{(M)}) \cdot \frac{\Delta x_w(E_{iAK}^{(M)})}{\Delta x_k(E_{iAK}^{(M)})} \cdot \frac{F_w(E_{iAK}^{(M)})}{F_k(E_{iAK}^{(M)})}, \quad (7)$$

де індекс « k » — поліілід картоп-Н.

Для фіксованих значень флюенсу АК співвідношення (7) запишеться у вигляді

$$R_{eW}(E_{AK}^{(N)}) = R_{ek}(E_{AK}^{(N)}) \cdot \frac{\Delta x_w(E_{iAK}^{(M)})}{\Delta x_k(E_{iAK}^{(M)})}. \quad (8)$$

Величина флюенсу $F_{AK}(E_{AK}^{(N)})$ для умов експлуатації полімеру, що тестується в атмосфері, відповідно до умов стендових випробувань, визначиться після підстановки $R_{eW}(E_{iAK}^{(M)})$ і $R_{ek}(E_{AK}^{(N)})$ з (6), (8) у вираз (2).

Область припустимих навантажень при прискорених випробуваннях визначається з умов $\Phi_{AK}^{(N)} \leq \Phi_{AK}^{(M)} \leq \Phi_{AK}^{(\max)}$ для щільності потоку АК. При фізичному моделюванні тривалої взаємодії

потоку АК з матеріалами КА ця умова відповідає вимозі, щоб процеси на поверхні тестованого матеріалу ініціювалися лише одним співударенням частинок і не перекривалися в часі. На стенді для концентрації частинок і щільності потоку повинні виконуватися умови $N_{AK}^{(M)} \leq 10^{12} \text{ см}^{-3}$ і $\Phi_{AK}^{(M)} \leq 10^{18} \text{ атомО/см}^2\text{с}$. Ці умови є прийнятними для більшості матеріалів КА: для полімерів $\Phi_{AK}^{(\max)} \leq 10^{20} \text{ атомО/см}^2\text{с}$; для металів — $\Phi_{AK}^{(\max)} \leq 10^{27} \text{ атомО/см}^2\text{с}$.

3. ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1. Стенд. Зразки матеріалів. Експериментальні дослідження провадилися на плазмоелектродинамічному стенді Інституту технічної механіки НАН України, що має статус «науковий об'єкт — національне надбання України». Стенд належить до класу плазмових газодинамічних труб. Безмасляна система відкачування продуктивністю за повітрям до $50 \text{ м}^3/\text{с}$ (вакуумний електроорзрядний агрегат і система турбомолекулярних насосів), наявність кріопанелей, які охолоджуються рідким азотом, дають можливість створювати у вакуумній камері стенда — циліндрі діаметром 1.2 м і довжиною 3.5 м — статичне розрідження 10^{-5} Па , а при натіканні газу — 10^{-3} Па .

Зразки тестових матеріалів і діагностичні засоби стенда розміщено на рухливих платформах (верхній та нижній) із чотирма ступенями свободи кожна. Платформи забезпечують кутові і поздовжні переміщення в горизонтальній площині, переміщення у вертикальній площині та обертання навколо вертикальної осі. Точність відліку для лінійних переміщень становить 0.5 мм, для кутових — 0.5°. Під час експерименту зразки матеріалів, які тестуються, і діагностичні зонди можуть переміщатися практично у будь-яку точку потоку плазми і об'єму вакуумної камери стенда. Як зразки матеріалів використовувалися полімерні плівки полііміду картоп-Н ($\text{C}_{22}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{N}_2$, об'ємна щільність $\rho_w \approx 1.42 \text{ г/см}^3$) товщиною $x_w \approx 50.7 \text{ мкм}$. Зразки виготовлено у вигляді дисків діаметром 50 мм; діаметр поверхні плівки, що опромінюється, становить 45 мм. Зразки полімерів розміщено на підкладці з алюміній-магнієвого сплаву АМг-6М товщиною 3 мм, який виконує роль термостата. Діаметр

робочої зони струменя на відстані 60 см від зрізу джерела плазми дорівнює 20 см. Робоча зона струменя плазми — область із рівномірним розподілом концентрації, швидкості АК і зовнішнього магнітного поля. Вимірювання і контроль температури плівки і підкладки здійснювалися мініатюрними термopарами діаметром 0.1 мм і пірометром GM1500 у діапазоні температур $243 \leq T_w \leq 1773$ К з похибкою 1.5 %. У ході експериментів температура плівки при нормальних кутах опромінювання ($\theta \approx 0 \dots 10^\circ$) іонами плазми не перевищувала 340 К, а при ковзних кутах опромінювання ($\theta \geq 60^\circ$) — 315 К, де θ — кут між вектором швидкості частинки і нормаллю до поверхні зразка. Для вимірювання вагових характеристик зразків матеріалів використовувалися аналітичні ваги з похибкою порядку 10^{-5} г. Втрачена маса — різниця показань ваг за 1 год до експозиції та через 1 год після експозиції у потоці плазми. Таке зважування поза вакуумною камерою з інтервалом 1 год до і після вакуумування і опромінювання плазмою забезпечує ідентичні умови визначення маси зразка-мішені. Частка адсорбованого газу при експозиції зразка у повітрі при атмосферному тиску становить 10...15 % від втрати маси полііміду картон-Н при опромінюванні його протягом 1 год іонами АК з енергією $E_{iAK} \approx 5$ еВ. Втрата маси плівки $\delta M_w = M_1 - M_2$, де M_1, M_2 — маси зразка плівки до і після експонування у потоці плазми та у вакуумі. Внесок адсорбованих газів $\delta M_{адс}$ у повітрі при атмосферному тиску до і після вакуумування і опромінювання потоком плазми враховувався таким чином:

$$\delta M_w \approx (M_1 + \delta M_{адс}) - (M_2 + \delta M_{адс}).$$

Як джерело високоенергійних іонів потоків плазми атомарно-молекулярного кисню ($O^+ + O_2^+$) використовувався газорозрядний прискорювач з «саморозгоном» плазми (з іонізацією робочого тіла O_2 електронним ударом і осциляцією електронів у зовнішньому магнітному полі). Застосування прискорювача плазми дозволяє одержувати в робочій зоні струменя потоки АК з концентрацією іонів $N_{iAK} = 10^8 \dots 10^{10}$ см $^{-3}$ і енергією $E_{iAK} = 5 \dots 100$ еВ. Енергія спрямованого руху потоку іонів E_{iAK} контролю-

ється багатоелектродним зондом. Розкид значень E_{iAK} , що вимірюються, не перевищує ± 4.5 %.

На зразки впливають атомарні іони і швидкі нейтральні атоми кисню. Сумарний флюенс АК у місці розташування зразків полімерних матеріалів можна представити у вигляді суми флюенса іонів F_{O^+} і флюенсу F_O швидких нейтральних атомів:

$$F_{AK} \approx F_{O^+} + F_O = N_{O^+} U_{O^+} t + N_O U_O t \approx \approx \xi_{di} N_{i\Sigma} U_{O^+} t \left(1 + \frac{N_O U_O}{N_{O^+} U_{O^+}} \right), \quad (9)$$

де U_O і N_O — швидкість і концентрація швидких нейтральних атомів кисню, ξ_{di} — ступінь дисоціації іонів плазми, $N_{i\Sigma}$ — сумарна концентрація іонів кисню.

3.2. Іони атомарного кисню. Для визначення концентрації іонів у потоці плазми на стенді використовуються: мікрохвильовий інтерферометр, який працює на частоті 5.45 ГГц; система електричних зондів (циліндричний, плоский і багатоелектродний зонд-аналізатор) і циліндр Фарадея. Реєстрація вольтамперних характеристик (ВАХ) провадиться в автоматичному режимі. Похибка вимірювань зондового струму не перевищує ± 2 %. Потенціал плазми вимірюється по точці розбіжності характеристик холодного і нагрітого термозонда. Розкид значень потенціалу плазми не перевищує ± 4 %. Пік іонного струму насичення, який реєструється зондом при обертанні в горизонтальній площині (навколо вертикальної осі), відповідає орієнтації осі зонда вздовж по потоку, а півширина піка іонного струму насичення пропорційна ступеню неізотермічності розрідженої плазми — відношенню температури іонів до температури електронів T_i/T_e . Електричний циліндричний зонд використовується і для визначення ступеня дисоціації ξ_{di} іонного компонента потоку плазми атомарно-молекулярного кисню безпосередньо в робочій зоні струменя біля поверхні зразків. Ступінь дисоціації іонного компонента плазми атомарно-молекулярного кисню можна записати у вигляді

$$\xi_{di} = \frac{N_{ia}}{N_{i\Sigma}} = \frac{N_{ia}}{N_{ia} + N_{i\Sigma}}.$$

Іонний струм насичення $I_{i\Sigma}$ на циліндричний зонд, орієнтований перпендикулярно до вектора швидкості потоку плазми, дорівнює

$$I_{i\Sigma} = I_{ia} + I_{im} = \frac{(1 + 0.4\xi_{d_i})A_p}{\pi} eN_{i\Sigma}U_{im} \sqrt{1 + \frac{2e\phi_w}{M_i U_{im}^2}},$$

а ступінь дисоціації іонного компонента визначиться з формули

$$\xi_{d_i} \approx 2.5 \left[I_{i\Sigma} / \left(I_{oi} \sqrt{1 + \frac{2e\phi_w}{M_i U_{im}^2}} \right) - 1 \right],$$

де $N_{i\Sigma} = N_{ia} + N_{im}$ — концентрація іонів $O^+ + O_2^+$, індекс «а» відповідає атомарним, «m» — молекулярним іонам кисню, I_{ia} , I_{im} — іонний струм насичення атомарних і молекулярних іонів, A_p — площа поверхні зонда, e — заряд електрона, U_{im} , M_i — швидкість і маса молекулярних іонів, $\phi_w = \phi_p - \phi_0$ — потенціал зонда ϕ_p відносно потенціалу плазми ϕ_0 , $I_{oi} = (A_p / \pi) N_{i\Sigma} U_{im}$ — іонний струм на зонд при $\phi_w = 0$.

Паралельно з електричними зондами для визначення концентрації заряджених частинок у потоці плазми служить мікрохвильовий інтерферометр. За результатами зондових і мікрохвильових вимірювань з використанням умови квазінейтральності плазми можна оцінити:

— наявність негативних іонів у потоці плазми атомарно-молекулярного кисню $N_i^- \approx (N_e + N_i^-)_{\text{зонд}} - N_{\text{мік}}$, де N_e — концентрація електронів, N_i^- — концентрація негативних іонів;

— сумарну концентрацію позитивних атомарних і молекулярних іонів $N_e + N_i^- \approx N_{i\Sigma} = N_{ia} + N_{im}$.

Такий підхід є виправданим — мікрохвильова діагностика заснована на розсіюванні електро-

магнітного випромінювання на вільних електронах іонізованого середовища.

Склад залишкового газу у вакуумній камері стенда контролюється мас-спектрометром MX7307. За результатами мас-спектроскопічного аналізу при статичному тиску $2 \cdot 10^{-5}$ Па в залишковому газі у вакуумній камері стенда переважають $CO + N_2$ і H_2 із концентрацією нейтральних молекул $N_n \approx 2.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. При робочому тиску $5 \cdot 10^{-3}$ Па у плазмовому струмені основними компонентами є швидкі іони O^+ та O_2^+ . У камері іонізації і на зрізі прискорювача плазма практично повністю іонізована. У робочому перетині струменя сумарна концентрація іонів $N_{i\Sigma} \approx 8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Концентрація іонів O^+ атомарного кисню при $\xi_{d_i} \approx 0.79$ дорівнює $N_{iAK} \approx 6.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, а іонів O_2^+ молекулярного кисню — $N_{O_2^+} \approx 1.7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

3.3. Швидкі нейтральні атоми у потоці плазми. Концентрація N_O швидких ($U_O \approx U_{O^+}$) нейтральних атомів АК, що виникли при зіткненнях частинок, пропорційна коефіцієнтам:

— радіаційної і ударно-радіаційної рекомбінації β_r при захопленні вільних електронів швидкими іонами АК ($O^+ + e^- \rightarrow O + hv$, hv — електромагнітне випромінювання);

— рекомбінація дисоціації β_{di} електронів плазми при зіткненні з молекулярними іонами ($O_2^+ + e^- \rightarrow O + O$);

— іонно-молекулярних обмінних реакцій β_{im} (перезарядження іонів O^+ при зіткненнях з нейтральними молекулами залишкового газу і кисню).

У табл. 1 наведено значення коефіцієнтів рекомбінації у потоці розрідженої плазми на стенді.

Частина швидких атомів O, які утворилися в результаті реакцій рекомбінації при зіткненнях заряджених часток плазми з молекулами залиш-

Таблиця 1. Параметри, які характеризують утворення швидких нейтральних атомів АК при реакціях під час зіткнення частинок у потоці плазми атомарно-молекулярного кисню

Реакції	Коефіцієнти рекомбінації, $10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$	Кількість актів рекомбінації, $10^6 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$	Концентрація швидких нейтральних атомів кисню, 10^3 см^{-3}
Радіаційна та ударно-радіаційна рекомбінація	0.22	5.3	0.17
Рекомбінація дисоціації	40...400	56...560	1...10
Іонно-молекулярні обмінні реакції	3...4	24...320	16000...240

Таблиця 2. Середні значення коефіцієнтів рекомбінації β_{am} при зіткненнях атомів АК з молекулами залишкового газу

Компонент	H ₂	N ₂	СО
$\beta_{am}, \text{см}^3\text{с}^{-1}$	$6 \cdot 10^{-16} \dots 2 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-17} \dots 6 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-14} \dots 7 \cdot 10^{-11}$

кового газу СО, N₂ і H₂, зникає з об'єму. Концентрація нейтральних частинок залишкових газів (без витрати газу) $N_n \approx 2.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Максимальні значення коефіцієнтів рекомбінації атомів О з молекулами СО, N₂ і H₂ при теплових швидкостях не перевершують константи швидкості пружного (газокінетичного) зіткнення $\beta_{am} \leq 10^{-10} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$. При високих енергіях константа швидкості рекомбінації наближається до газокінетичних значень. Середні значення коефіцієнтів рекомбінації при зіткненнях атомів АК з молекулами залишкового газу на стенді наведено у табл. 2.

З використанням даних табл. 1, 2 для концентрації швидких нейтральних атомів, які утворюються в результаті обмінно-зіткнувальних реакцій на стенді, маємо:

- радіаційна і ударно-радіаційна рекомбінація $N'_O / N_{O^+} \approx 4 \cdot 10^{-8}$;
- рекомбінація дисоціації $N_O^d / N_{O^+} \approx 2.5 \cdot 10^{-7} \dots 2.5 \cdot 10^{-6}$;
- іонно-обмінні зіткнення $N_O^{im} / N_{O^+} \approx 6 \cdot 10^{-5} \dots 4 \cdot 10^{-3}$;
- зіткнення із залишковими газами $N_O^{am} / N_{O^+} \approx 10^{-1} \dots 10^{-5}$.

Таким чином, з урахуванням реакцій зіткнення для швидких атомів АК і іонів АК з високою точністю виконується умова $N_O U_O / N_{O^+} U_{O^+} \ll 1$.

При опроміюванні зразків матеріалу потоком плазми атомарно-молекулярного кисню визначальним є вплив іонів АК, і формулу (9) можна представити у вигляді

$$F_{AK} \approx F_{O^+} \approx \xi_{d_i} N_{i\Sigma} U_{O^+} t. \quad (10)$$

4. ДЕГРАДАЦІЯ ПОЛІМІДУ ПРИ ОПРОМІНЮВАННІ ВИСОКОШВИДКІСНИМИ ІОНАМИ АТОМАРНОГО КИСНЮ

4.1. Коефіцієнт ерозії. При впливі на полімер потоків АК деградація матеріалу зумовлена проце-

сом фізичного розпилення, посиленого хімічними реакціями (хімічним травленням) [5].

На рис. 1 приведено залежність об'ємного коефіцієнта ерозії (реакційної ефективності) поліміду картон-Н від енергії іонів АК, які бомбардують поверхню: 1 — дані вимірювань авторів при енергіях іонів $E_{iAK} \approx 5.0, 31.6, 70, 75, 80$ і 90 еВ; 2, 3, 5, 6 — дані [1, 20]; 4 — [3]; 7 — [4]; 8 — апроксимація авторів (11)

$$R_{ek} \approx 0.4(\alpha_i E_{iAK})^{1.268} \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомО}, \quad (11)$$

де $\alpha_i = 1 \text{ еВ}^{-1}$.

Розраховані при $E_{iAK} \approx 4.5 \text{ еВ}$ ($U_{iAK} \approx 7.5 \text{ км/с}$) значення $R_{ek} \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{іонО}$ узгоджуються зі значеннями R_{ek} , отриманими за результатами випробувань поліміду картон-Н на МКС [4, 18].

Поліімід картон-Н інертний до впливу вакуумного ультрафіолету (ВУФ) у верхній атмосфері Землі. Вплив АК призводить до окисної деструкції полімеру з утворенням летких оксидів СО, СО₂, Н₂О і ОН. Вакуумний ультрафіолет посилює дію АК на полімери та ініціює десорбцію молекул СО, СО₂, Н₂О, ОН і Н₂ з поверхні, збільшує ерозію полімеру в декілька разів [10, 22, 26, 29, 30].

Критерієм оцінки синергетичного ефекту впливу АК+ВУФ на деградацію полімерів у верхній атмосфері Землі може служити відношення потоків ВУФ і АК. Визначити критерій для синергетичного ефекту впливу АК+ВУФ на полімери можна тільки експериментально. Умовою стендового моделювання впливу ВУФ на полімери в атмосфері Землі є рівність $\Phi_{vN} t_{vN} \approx \Phi_{vM} t_{vM}$ (Φ_v — щільність потоків енергії випромінювання, індекс N — атмосфера, індекс M — стенд), звідки $\Phi_{vM} = \Phi_{vN} t_{vN} / t_{vM} = \Phi_{vN} K_{прс}^{BY\Phi}$, де $K_{прс}^{BY\Phi}$ — коефіцієнт прискорення стендових випробувань. Максимум щільності потоку ВУФ у атмосфері Землі в діапазоні довжин хвиль $\lambda_n = 10 \dots 165 \text{ нм}$ припадає на випромінювання в α -лінії Лаймана для атома водню при $\lambda_n = 121.51 \text{ нм}$.

Авторами за даними [10, 22, 26, 29] і результатами випробувань на стенді ІТМ при опромінюванні зразка поліміду картон-Н іонами АК з енергією $E_{iAK} \approx 6.9 \text{ еВ}$ і потоком енергії випромінювання ВУФ, яке генерують водневі лампи

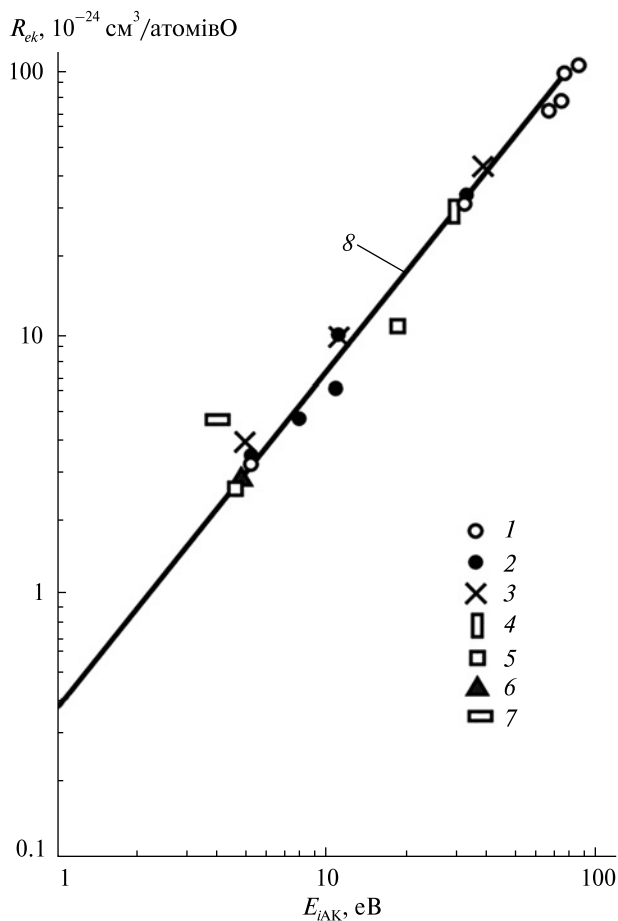


Рис. 1. Залежність об'ємного коефіцієнта ерозії R_{ek} полімеру картон-Н від енергії іонів АК E_{iAK} : 1 — виміри авторів у потоках іонів АК з енергіями $E_{iAK} \approx 6.9, 31.6, 70, 75, 80$ і 90 eВ, 2, 3, 5, 6 — дані [1, 20], 4 — дані [3] при $E_{iAK} \approx 30$ eВ, 7 — дані [4], 8 — апроксимація (11)

ВМФ-25, у роботі [24] отримано залежність зміни глибини ерозії $\Delta x_k^{AK+BY\Phi}$, нормованої на Δx_k^{AK} (див. рис. 2): 1 — вимірювання авторів, 2 — дані [25], 3 — вимірювання [22], 4 — КА «Spot-1» (висота 830 км) [20], 5 — апроксимація авторів (12):

$$\Delta x_k^{AK+BY\Phi} / \Delta x_k^{AK} \approx 9.893 \cdot 10^8 (\alpha_v \Phi_v / \Phi_{AK})^{0.636}, \quad (12)$$

де $\alpha_v = 1$ (мДж/атомО)⁻¹.

Граничним значенням відношення Φ_v / Φ_{AK} , яке характеризує синергетичний ефект впливу АК+ВУФ на глибину ерозії або втрату маси поліміду картон-Н, є значення $\Phi_v / \Phi_{AK} \approx 7.1 \cdot 10^{15}$ мДж/атомО [24].

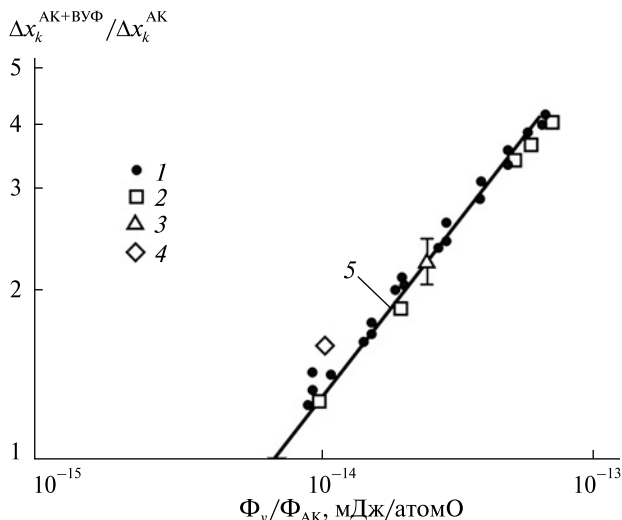


Рис. 2. Залежність зміни глибини ерозії поліміду $\Delta x_k^{AK+BY\Phi}$ під впливом АК+ВУФ, нормованої на Δx_k^{AK} , від відношення щільності потоку енергії випромінювання ВУФ до щільності потоку АК: 1 — вимірювання авторів, 2 — вимірювання [25], 3 — дані [22], 4 — дані КА «Spot-1» (висота 830 км) [20], 5 — апроксимація (12)

4.2. Деструкція поверхні. Термооптичні характеристики поліміду. Наслідком розпилення поверхні при опромінюванні поліміду гіпертепловим потоком АК є деструкція («розпушення») поверхні, зміна рельєфу, ступеня шорсткості. На поверхні полімеру під впливом АК формуються, як правило, cone-like (конусоподібна), або saget-like (килимоподібна, ворсиста) структури [14, 27, 28]. Змінюються також і термооптичні характеристики поверхні полімеру: інтегральний коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання A_s та інтегральний коефіцієнт ε_N випромінювання в ІЧ-діапазоні (ступінь чорноти). Як і в роботах [27, 28], в ролі ступеня шорсткості поверхні полімеру використовуємо параметр вертикальної шорсткості: $\Delta h_W = h_W - h_{0W}$, де h_W — висота конуса структури cone-like, h_{0W} — висота початкової (технологічної) неоднорідності поверхні матеріалу. Параметри, які характеризують стан поверхні зразків поліміду, які тестуються на стенді ІТМ, визначалися із застосуванням:

— профілографа моделі 201 і мікроскопа МІМ-8,

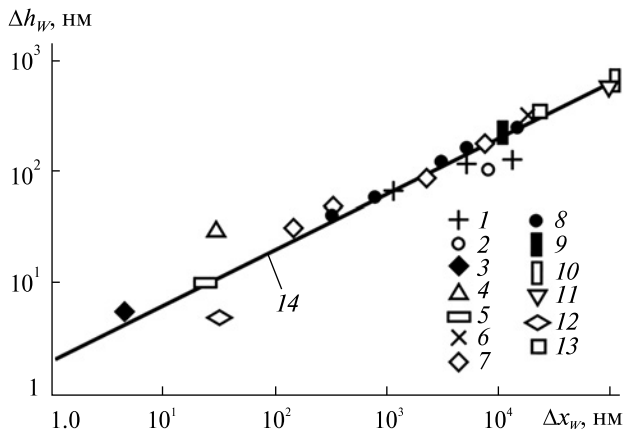


Рис. 3. Залежність параметра шорсткості Δh_w від глибини ерозії плівки полііміду Δx_w : 1 – [27], 2 – вимірювання [13], 3 – [19], 4 – [26], 5 – [30], 6 – [8], 7 – стендові вимірювання [14], 8 – результати експозиції полііміду на ОС «Мир» у верхній атмосфері Землі [1], 9 – [17], 10 – [26], 11 – [28], 12 – виміри авторів при $F_{iAK} = 6.7 \cdot 10^{18}$ іонО/см², $F_{iAK} = 1.2 \cdot 10^{20}$ іонО/см², $F_{iAK} = 10^{21}$ іонО/см² і $E_{iAK} = 6.9, 30, 80$ еВ, 13 – [6], 14 – апроксимація (13)

— спектрофотометра СФ-18 (коефіцієнти пропускання τ_s і відбиття ρ_s випромінювання для обчислення A_s),

— терморадіометра ТРМ «І» (інтегральний коефіцієнт випромінювання ϵ_N в ІЧ-діапазоні).

Для контролю температури поверхні полімеру використовувався пірметр GM 1500. Початкові значення параметрів зразків тестованого полііміду: $h_{0W} \approx 3.07 \pm 0.01$ нм, $A_{0s} \approx 0.219 \pm 0.01$, $\epsilon_{0N} \approx 0.52 \pm 0.01$. Початкові значення параметрів, отриманих при тестуванні полііміду, узгоджуються з аналогічними даними [22, 32, 33].

Дані рис. 3 ілюструють залежність параметра шорсткості Δh_w від глибини ерозії плівки полііміду Δx_w при опромінуванні полііміду потоком АК з енергіями частинок $E_{iAK} \approx 5 \dots 267$ еВ. Залежність 14 на рис. 3 – апроксимація авторів

$$\Delta h_w \approx \beta_2 \Delta x_w^{0.5} \text{ нм}, \quad (13)$$

де $\beta_2 = 2.07 \text{ нм}^{0.5}$. При $E_{iAK} \approx 4.6 \dots 7.5$ еВ залежність Δh_w від флюенсу АК можна представити апроксимацією авторів: $\Delta h_w \approx \beta_2^* F_w^{0.5}$ нм, де $\beta_2^* = 0.103 \text{ нм}^2$.

Наслідком деструкції («розпушення») поверхні полімеру при опромінуванні гіпертепловим потоком АК є зміна інтегрального коефіцієн-

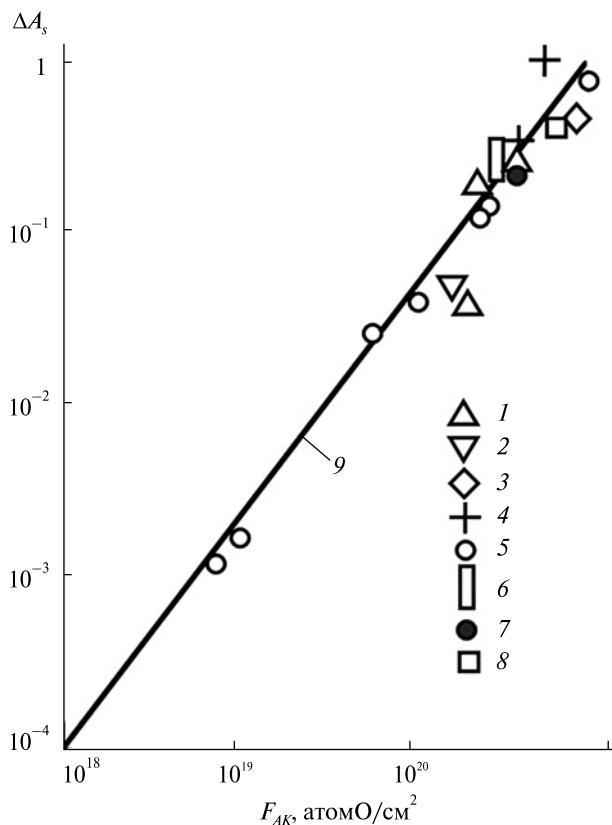


Рис. 4. Залежність зміни інтегрального коефіцієнта поглинання сонячного випромінювання ΔA_s від флюенсу АК: 1 – ОС «Мир» [1] при $F_{iAK} = (1.9 \dots 2.3) \cdot 10^{20}$ атомО/см² і $3.6 \cdot 10^{20}$ атомО/см², 2 – [22], 3 – [25], 4 – КА «Spot-1», «Spot-2», «Spot-4», «Space Shuttle») і стендових випробувань, залежність 9 – апроксимація авторів (14)

та поглинання сонячного випромінювання A_s . На рис. 4 наведено залежність $\Delta A_s = A_s - A_{0s}$ від флюенсу АК по даних супутникових (ОС «Мир», КА «Spot-1», «Spot-2», «Spot-4», «Space Shuttle») і стендових випробувань, залежність 9 – апроксимація авторів

$$\Delta A_s = 4.467 \cdot 10^{-28} (\beta_3 F_{iAK})^{1/3}, \quad (14)$$

де $\beta_3 = 1 \text{ см}^2/\text{атомО}$. Залежність ΔA_s від параметра шорсткості поверхні Δh_w полііміду апроксимує залежність авторів $\Delta A_s = 2.85 \cdot 10^{-7} (\beta_4 \Delta h_w)^{2.572}$, де $\beta_4 = 1 \text{ нм}^{-1}$.

За результатами випробувань авторів у потоці іонів АК при $E_{iAK} \approx 6.9$ еВ і $1.16 \cdot 10^{20} \leq F_{iAK} \leq 1.27 \cdot 10^{21}$ іонО/см² зміна інтегрального

коефіцієнта випромінювання полііміду kapton-H в ГЧ-діапазоні довжин хвиль $\Delta\varepsilon_N \approx \varepsilon_N - \varepsilon_{0N} \leq 0.05$ ($\varepsilon_N = 0.52...0.55$) не перевищує $\pm 10\%$.

5. ДИНАМІЧНИЙ ВПЛИВ ГІПЕРТЕПЛООВОГО ПОТОКУ АТОМАРНОГО КИСНЮ НА ПОЛІІМІД. КОЕФІЦІЄНТИ ПЕРЕДАЧІ ІМПУЛЬСУ ТА ЕНЕРГІЇ АК

Динамічну взаємодію твердого тіла з потоком розрідженого частково іонізованого газу значною мірою характеризують коефіцієнти передачі імпульсу та енергії. Коефіцієнти передачі (акомодації) імпульсу та енергії використовуються для визначення конвективних теплових потоків і аеродинамічних характеристик тіл при вільно-молекулярному обтіканні їх газом незалежно від прийнятої схеми взаємодії газових атомів з поверхнею тіла. Специфіку взаємодії потоків АК з полімерними конструкційними матеріалами КА вивчено слабо. У літературі відсутня у необхідному об'ємі інформація про розрахункові і експериментальні значення коефіцієнтів акомодації АК для практично важливого в аеродинаміці діапазону енергії частинок 5...10 eV ($U_{AK} = 8...10$ км/с), про вплив шорсткості поверхні полімерів на зміну аеродинамічних характеристик тіл протягом усього терміну експлуатації в атмосфері Землі. Інформація про особливості динамічної взаємодії потоків АК з полімерами на дуже низьких орбітах (VLEO), і зокрема з поліімідом kapton-H, важлива для практичного застосування.

Потоки імпульсу та енергії, які переносять атомарні іони і атоми кисню на поверхню полімеру в розрідженому середовищі, характеризуються коефіцієнтами акомодації нормального α_n , тангенціального α_t імпульсу та енергії α_e .

Силовий вплив потоку частково іонізованого газу низької щільності на полімер при «плаваючому» (рівноважному) потенціалі ϕ_{wf} на його поверхні на стенді визначається бомбардуванням електронами, іонами, швидкими і тепловими атомами кисню, які утворюються в результаті перезарядження іонів АК на залишковому газі, метастабілями тощо:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma f} &= P_{ef} + P_{if} + P_{AK} + P_{0n} + P_m + P_c + \dots = \\ &= P_{ef}(\phi_{wf}) + P_{if}(\phi_{wf}) + \Delta P, \end{aligned}$$

де P_{ef} — силовий тиск, зумовлений бомбардуванням полімеру електронами, P_{if} — силовий тиск іонів плазми, P_{AK} — внесок швидких атомів кисню, P_{0n} — силовий тиск теплових атомів кисню, P_m — силовий вплив метастабілей, P_c — сила кулонівської взаємодії, ΔP — сумарний вплив нейтральних частинок, що не залежить від потенціалу поверхні полімеру. Враховуючи той факт, що сила тиску, зумовлена бомбардуванням електронами, набагато менша від силового впливу інших компонентів потоку розрідженого частково іонізованого газу, внеском $P_c(\phi_{wf})$ можна знехотити. У потоці частково іонізованого газу низької щільності значення потенціалу ϕ_p на лицьовій поверхні полімеру, як правило, близьке до значення потенціалу плазми ϕ_0 ($\phi_{wf} = \phi_p - \phi_0 \approx 0$). На стенді ІТМ контроль потенціалу на поверхні полііміду ϕ_p здійснювався за допомогою бортової апаратури «Зонд-Заряд» безконтактного вимірювання напруженості електричного поля давачем «Зонд», які працюють у режимі динамічного конденсатора. Давач «Зонд» калібрувався за допомогою вимірювань та контролю потенціалу мідної пластини [23] електростатичним вольтметром С50 з похибкою вимірювань $\phi_p = \pm 1\%$. Як і в роботі [23], для оцінки величини ΔP використовувалася додаткова мішень — диск діаметром 50 мм із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. При позитивних потенціалах на поверхні сталевого диска, що відповідають області насичення електронного струму

$$P_{\Sigma \text{нас}}(\phi_{W\text{нас}}) \approx P_{ef}(\phi_{W\text{нас}}) + \Delta P \approx \Delta P,$$

а при «плаваючому» потенціалі на поверхні сталевого диска

$$P_{\Sigma f}(\phi_{wf}) \approx P_{if}(\phi_{wf}) + P_{ef}(\phi_{wf}) + \Delta P \approx P_{if}(\phi_{wf}) + \Delta P.$$

При оцінці внеску ΔP у силовий вплив плазми атомарно-молекулярного кисню прийнято, що для мішені з нержавіючої сталі і для мішені з полііміду kapton-H величини $P_{\Sigma f} / P_{\Sigma \text{нас}} \approx 1 + P_{if} / \Delta P \approx \text{const}$ і практично рівні. З урахуванням оцінки складу гіпертеплового потоку АК на стенді $\Delta P \ll P_{if}$ і $P_{\Sigma} \approx P_{iAK}$. При дослідженні динамічної взаємодії іонів АК зі зразками полііміду kapton-H (мішень — диск $\varnothing \approx 50$ мм) використовувалися співвідношення для коефіцієнтів пе-

редачі нормального (α_n) і тангенціального (α_t) імпульсу [23]

$$\alpha_n = \frac{2 - [e(P_x + P_y \operatorname{tg}\theta) / \sqrt{M_{iAK} E_{iAK} I_i (1 + \eta^2 / \cos^2 \theta)^{1/2}}]}{1 - \sqrt{\frac{\pi k T_W}{4 E_{iAK}} \cdot \frac{1 + \eta^2}{\cos^2 \theta + \eta^2}}} \quad (15)$$

$$i \quad \alpha_t = \frac{e(P_x - P_y \operatorname{ctg}\theta)}{\sqrt{2 M_{iAK} E_{iAK} I_i}}, \quad (16)$$

де P_x — сила лобового опору мішені, P_y — підйомна сила мішені, θ — кут атаки, A_W — площа поверхні, що опромінюється, $I_i = I_{0i} \cos \theta$, $I_{0i} = e N_{iAK} U_{iAK} A_W$ — іонний струм на поверхню мішені при $\theta = 0$, k — стала Больцмана, T_W — температура поверхні мішені, $\eta^2 = (e |\phi_W| + \chi) / E_{iAK}$,

$$\chi = \frac{3.6}{d(\text{Å})} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1}, \text{ eV}$$

— енергія, яку здобуває іон при впливі сил зображення [31], $\varepsilon = 3.4$ — діелектрична проникність полііміду картон-Н; d (Å) — відстань від поверхні мішені, на якій відбувається нейтралізація позитивного іона. Приблизно, з похибкою не більш $\pm 10\%$, d визначається як півсума діаметра газового іона та параметра решітки матеріалу (параметр кубічної решітки полііміду картон-Н $r_0 \approx 5.8636 \text{ Å}$ [7]). Отже, для пари «іон АК — поліілід картон-н» $d \geq 4 \text{ Å}$, і при $E_{iAK} = 6.9 \text{ eV}$ на стенді ІТМ $\eta^2 \leq 0.1$. З іншого боку, співвідношення (15) і (16) можна подати у вигляді

$$\alpha_n = \frac{2 - 0.5(c_x + c_y \operatorname{tg}\theta) / (\cos^2 \theta + \eta^2)^{1/2}}{1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2 S_W} \left(\frac{1 + \eta^2}{\cos^2 \theta + \eta^2} \right)^{1/2}} \quad (17)$$

$$i \quad \alpha_t = \frac{c_x \sin \theta - c_y \cos \theta}{\sin 2\theta}, \quad (18)$$

де $S_W = U_{iAK} / \sqrt{2 k T_W / M_{iAK}}$ — швидкісне відношення відбитих від поверхні полімеру іонів АК, $c_x = P_x / 2 \rho_i U_{iAK}^2 A_W$ і $c_y = P_y / 2 \rho_i U_{iAK}^2 A_W$ — коефіцієнти сили опору та підйомної сили відповідно.

Для вимірювання підйомної сили P_y і сили опору мішені P_x на стенді ІТМ використовувалися мікроваги компенсаційного типу [23],

виготовлені на основі стандартної магнітоелектричної системи мікроамперметра постійного струму. Для відстеження вимірювань застосовувався фотодіодний блок підсилювача постійного струму, який працює в комплекті з мікроамперметром. Компенсаційний струм, який протікає через рамку мікроамперметра магнітоелектричної системи, прямо пропорційний прикладеному до рамки механічному моменту. Для усунення можливого впливу вібрацій ваги встановлено на підставці, закріпленій на нижній рухливій платформі. Для підвищення чутливості мікроваг і зменшення внеску ΔP у баланс сил державку мішені поміщено в діелектричну трубку із внутрішнім діаметром 1.8 см. Із цією метою бокова та тіньова сторони мішені захищені від впливу частинок потоку, що набігає, екраном під потенціалом, рівним потенціалу мішені ϕ_p . Діапазон сил, які вимірюються на плечі довжиною 45 см, охоплює від $5 \cdot 10^{-7}$ до 0.01 Н. Похибка вимірювань сили опору мішені в розглянутому діапазоні не перевищує $\pm 4.5\%$.

На рис. 5 представлено залежності коефіцієнтів акомодатії нормального (α_n) та тангенціального (α_t) імпульсу, коефіцієнта енергії α_e при $E_{iAK} = 6.9 \text{ eV}$ ($U_{iAK} \approx 9.1 \text{ км/с}$), $F_{iAK} \approx 6.7 \times 10^{18} \text{ іонО/см}^2$ і $\Delta h_W \approx 23.7 \text{ нм}$. Крива 2 на рис. 5 — апроксимація авторів:

$$\alpha_n(\theta) = \alpha_{0n} \left[\cos \theta + 1.033 \left(1 + \frac{1}{\alpha_{0n}} \right)^{-1} \sin^2 \theta \right]. \quad (19)$$

Значення коефіцієнта акомодатії енергії $\alpha_e(\theta)$ (точки 5) отримано з використанням моделей квазідзеркального і дифузного («косинусного») розсіювання частинок потоку, що набігає, на поверхню твердого тіла [11]

$$\alpha_e(\theta) = 1 - \zeta (1 - 0.5 c_x(\theta))^2, \quad (20)$$

де $\zeta = 1 / (\cos 2\theta)^2$ — дзеркальне відбиття для кутів, близьких до нормального падіння частинок, а для ковзних кутів $\zeta = 1 / 0.444 (\cos \theta)^2$ — дифузійне розсіювання [11].

Залежності коефіцієнта акомодатії нормального імпульсу $\alpha_n(\theta)$, виміряні авторами для двох режимів опромінювання полііміду при $E_{iAK} = 6.9 \text{ eV}$, $F_{iAK} \approx 6.7 \cdot 10^{18} \text{ іонО/см}^2$ і параметра шорсткості поверхні $\Delta h_W \approx 23.7 \text{ нм}$, а також при

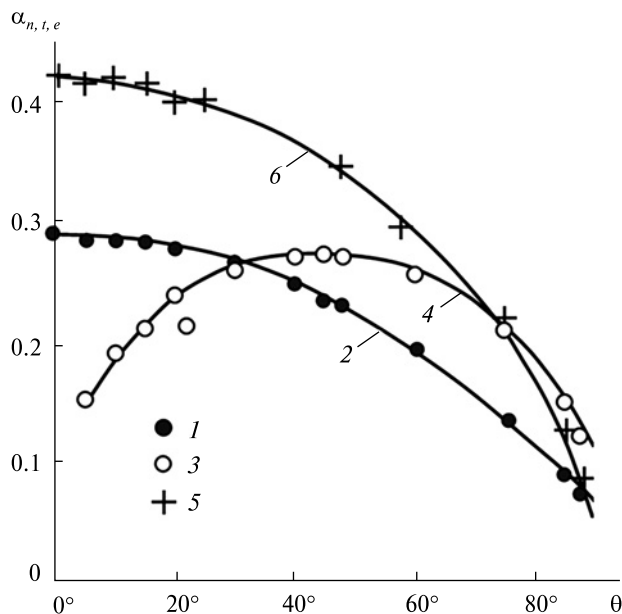


Рис. 5. Залежності коефіцієнтів передачі імпульсу і енергії іонів АК від кута атаки θ елемента поверхні полііміду: 1, 3 — значення α_n і α_t , розраховані за (15) і (16) з використанням вимірних значень P_x і P_y , 2 — апроксимація (19), 4 — $\alpha_t(\theta) = \alpha_{t45} [\sin 2\theta + 0.394(\cos 2\theta)^2]$, значення α_{0n} , α_{0e} відповідають куту $\theta = 0$, α_{t45} — куту $\theta = 45^\circ$, 5 — α_e , розраховані за (20) і вимірними значеннями $c_x(P_x)$, 6 — апроксимація $\alpha_e(\theta) = \alpha_{0e} [\cos^{0.7}\theta + 1.364 \times (1 + 1/\alpha_{0e})^{-2} \sin^{2.5}\theta]$

$E_{iAK} = 6.9$ eВ; $F_{iAK} \approx 1.16 \cdot 10^{20}$ іонО/см², $\Delta h_w \approx 110$ нм наведено на рис. 6. Відповідні залежності $\alpha_e(\theta)$ можуть бути отримані за допомогою апроксимації авторів

$$\alpha_e(\theta) = 0.845[1 - (\alpha_n(\theta))^2].$$

За ступенем дисоціації іонів плазми атомарно-молекулярного кисню ξ_{d_i} умови опромінювання мішені полііміду на стенді при вимірюванні коефіцієнтів акомодатії імпульсу та енергії $\alpha_{n,t,e}(\theta)$ близькі до умов для нейтрального кисню на VLEO (170...300 км) [9]. Отримані для елемента поверхні полііміду картон-Н значення та залежності коефіцієнтів акомодатії імпульсу і енергії (рис. 5, 6) можуть використовуватися при розрахунках аеродинамічних характеристик тіл будь-якої геометричної форми, незалежно від прийнятої схеми (моделі) динамічної взаємодії в системі «АК — поліімід».

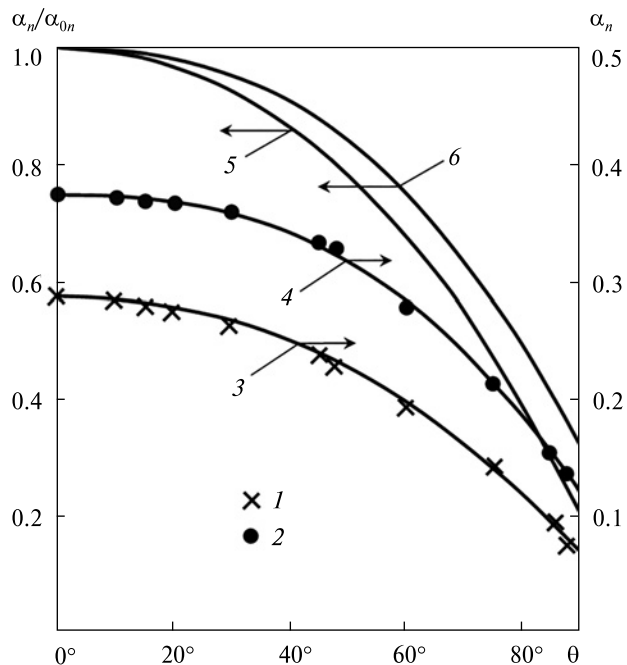


Рис. 6. Кутові залежності коефіцієнта акомодатії нормального імпульсу, виміряні для двох режимів опромінювання полііміду: 1 — $E_{iAK} = 6.9$ км/с, $F_{iAK} \approx 6.7 \cdot 10^{18}$ іонО/см², $\Delta h_w \approx 23.7$ нм (режим 1), 2 — $E_{iAK} = 6.9$ км/с, $F_{iAK} \approx 1.2 \cdot 10^{20}$ іонО/см², $\Delta h_w \approx 110$ нм (режим 2), 3, 4 — апроксимація (19), 5, 6 — нормовані кутові залежності $\alpha_n(\theta)/\alpha_{0n}$ для режиму 1 і 2 відповідно

6. ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ РЕЖИМІВ ВЗАЄМОДІЇ «АТОМАРНІЙ КИСЕНЬ — ПОЛІМЕР» В АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ І НА СТЕНДІ

Умову еквівалентності режимів взаємодії «АК — полімер» на орбіті в атмосфері Землі і на стенді можна отримати на основі термодинамічного (ентропійного) критерію еквівалентності навантаження матеріалів при прискорених ресурсних випробуваннях. Відповідно до критерію еквівалентності два режими навантаження є еквівалентними, якщо вони викликають у матеріалі однакові збільшення необоротної складової ентропії. Для процесу розпилення полімерів частинками АК в атмосфері і на стенді такою умовою може бути рівність значень втрати маси з одиниці площі поверхні або глибини ерозії плівки полімеру (1). Зв'язок між параметрами, що характеризують умови експлуатації полімеру в атмосфері Землі і їхніми значеннями при

тестуванні матеріалів на стенді визначає співвідношення (2). При використанні полііміду kapton-H у ролі еталонного полііміду при відомих E_{iAK} і F_{iAK} співвідношення (7) можна представити у вигляді (8). Після підстановки значень $R_{eW}(E_{iAK}^{(M)})$, $R_{eW}(E_{iAK}^{(N)})$ і $R_{eW}(E_{iAK}^{(N)})$ в (8) з (2) визначиться величина $F_{AK}^{(N)}$ флюенсу АК для умов експлуатації полімеру, який підлягає тестуванню, в атмосфері Землі на VLEO.

При випробуваннях полііміду на стенді ІТМ у високошвидкісному потоці іонів АК з енергією $E_{iAK}^{(M)} \approx 80$ еВ; $R_{ek} \approx 1.035 \cdot 10^{-22}$ см³/іонО і концентрацією частинок $N_{iAK}^{(M)} \approx 6.3 \cdot 10^9$ іонО/см³ у порівнянні з режимом взаємодії «АК — поліімід» на VLEO (~250 км) при середньому рівні сонячної активності [9] ($E_{AK}^{(N)} \approx 4.5$ еВ; $R_{ek} \approx 3 \cdot 10^{-24}$ см³/атомО і $N_{AK}^{(N)} \approx 10^9$ атом/см³) коефіцієнт прискорення дорівнює $K_{прс} \approx 917$. Річний цикл взаємодії «АК — поліімід» на VLEO відтворюються на стенді за $t^{(M)} \approx 9.6$ год. При цьому флюенс іонів АК дорівнює $F_{iAK}^{(M)} \approx 6.8 \cdot 10^{20}$ іонО/см². Тобто, режим на стенді при $F_{iAK}^{(M)} \approx 6.8 \cdot 10^{20}$ іонО/см² еквівалентний режиму взаємодії «АК — поліімід» на висоті 250 км при флюенсі $F_{AK}^{(N)} \approx 2.34 \cdot 10^{22}$ атом/см². Ця величина узгоджується із значенням річного флюенсу АК на висоті 250 км [9], який обчислено за формулою: $F_{AK}^{(N)} = N_{AK} \cdot U_{AK} \cdot t = 2.37 \cdot 10^{22}$ атомО/см².

7. ВИСНОВКИ

Розроблено процедури прискорення стендових ресурсних випробувань полімерних матеріалів

КА на стійкість до тривалого впливу гіпертеплового атомарного кисню в атмосфері Землі у потоках розрідженої плазми атомарних іонів з енергіями 30...100 еВ з використанням полііміду kapton-H (або його аналогів) як еталонний матеріал.

За результатами аналізу льотних випробувань на ОС «Мир», МКС, КА «Space Shuttle», «Spot-1», «Spot-2», «Spot-4» та ін., а також стендових випробувань, зокрема стендових випробувань авторів, отримано значення комплексу параметрів, які характеризують взаємодію полііміду kapton-H з потоками швидких атомарних іонів кисню з енергією $E_{iAK} > 4.5$ еВ. Визначено залежності комплексу параметрів від флюенсу АК:

- шорсткості,
- коефіцієнта поглинання сонячного випромінювання,
- коефіцієнта випромінювання полімеру (ступінь чорноти) в ІЧ-діапазоні,
- коефіцієнтів передачі нормального, тангенціального імпульсу і енергії АК при зіткненні частинок з поверхнею від кута опромінювання елемента поверхні полімеру kapton-H.

Залежності дозволяють прогнозувати зміну комплексу параметрів полііміду при тривалій експлуатації на висотах 150...800 км, а також можуть використовуватися як еталонні значення при тестових випробуваннях полімерних конструкційних матеріалів на їхню стійкість до тривалого впливу АК.

REFERENCES

1. Allegri G., Corradi S., Marchetti M., Milinchuk K. (2003). On degradation of polymeric thin films in LEO Space Environment. *Proc. 9th Int. Symp. Materials*, 255—264.
2. Balmain K. G., Dubois G. R. (1979). Surface discharges on Teflon, Mylar and kapton. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, **NS-26**, № 6, 5146—5151.
3. Banks V. A., Backus J. A., Manno M. V., Waters D. L., Cameron K. C., de Groh K. K. (2011). Prediction of atomic oxygen erosion yield for spacecraft polymers. *J. Spacecraft and Rockets*, **48**, № 1, 14—22. doi: 10.2514/1.48849.
4. Banks V. A., Waters D. L., Thorson S. D., de Groh K. K., Snyder A., Miller S. K. (2006). Comparison of atomic oxygen erosion yields of materials at various energy and impact angles. *NASA/TM—2006-214363*, 7 p.
5. Behrisch R. (1983). *Sputtering by practical bombardment II*. Berlin-Heidelberg-New York-Tokio: Springer Verlag, 410 p.
6. Bitetti G., Marchetti M., Mileti S., Valente F., Scaglione S. (2007). Degradation of the surfaces exposed to the space environment. *Acta Astronautica*, **60**, № 3, 166—174. doi: 10.1016/j.actaastro.2006.07.019
7. Chen L., Lee C. H. (2006). Interaction potential between atomic oxygen and polymer surface in low Earth orbit. *J. Spacecraft and Rockets*, **43**, № 3, 487—496. doi: 10.2514/1.13373
8. Duo S., Li M., Zhou Y. (2006). Effect of ion implantation upon erosion resistance of polyimide films in space environment. *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, **16**, № 2, s661—s664. doi: 10.1016/S1003-6326(06)60273-2
9. ECSS-10-04 A. (2009). Space Environment. ESA-ESTEC. 219 p.

10. Gonzalez R. I., Tomczak S. J., Minton T. K., Brunsvold A. L., Hoflund G. B. (2003). Synthesis and atomic oxygen erosion testing of space survivable POSS (polyhedral oligomeric silsesquioxane) polyimides. *Proc. 9th Int. Symp. Materials in a Space Environment*, 113–120.
11. Goodman F. O., Wachman H. Y. (1976). *Dynamics of gas-surface scattering*. New-York, San Francisco, London: Academic Press, 342 p.
12. Goto A., Imeda K., Yukumatsu K., Kimoto Y. (2021). Property changes in materials due to atomic oxygen in the low Earth orbit. *CEAS Space J.*, **13**, № 3, 415–432. doi: 10.1007/s12567-021-00376-2
13. Grossman E., Gouzman I. (2003). Space environment effects on polymers in low Earth orbit, Nuclear. *Instruments and Methods in Phys. Res.*, **B.208**, 48–57. doi: 10.1016/S0168-583X(03)00640-2
14. Grossman E., Gouzman I., Lemper G., Noter Y., Lifshitz Y. (2004). Assessment of atomic oxygen flux in Low-Earth-Orbit ground simulation facilities. *J. Spacecraft and Rockets*, **41**, № 3, 356–359. doi: 10.2514/1.10890.
15. Koontz S. L., Leger L.J., Rickman S.L. (1995). Oxygen interaction with material III-mission and induced environment. *J. Spacecraft and Rockets*, **32**, № 3, 475–495. doi: 10.2514/3.26640.
16. Kuvaldina E. V., Lyubimov V. K., Rybkin V. V. (1992). Velocity constant and probability of interaction of atomic oxygen with polyimide films. *High Energy Chemistry*, **26**, 475–478.
17. Lian R., Lei X., Xue S., Chen Y., Zhang Q. (2021). Janus polyimide films with outstanding AO resistance, good optical transparency and high mechanics strength. *Appl. Surface Sci.*, **535**, 147654. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147654
18. Miller S. K., Dever J. A. (2011). Materials International Space Station experiment 5 polymers films thermal control experiment. *J. Spacecraft and Rockets*, **48**, № 2, 240–245. doi: 10.2514/1.49482.
19. Naddaf M., Balasubramanin C., Alegaonkar P. S., Bhoraskar V. N., Mandel A. B., Ganeshan V., Bhoraskar S. V. (2004). Surface interaction of polyimide with oxygen ECR plasma. *Nucl. Instruments and Meth. Phys. Res.*, **B222**, № 1-2, 135–144. doi: 10.1016/j.nimb.2003.12.087
20. Paillons A. (1987). Spacecraft surface exposure to atomic oxygen in LEO. *Technol. Environment Spatial*. Toulouse: ESA, 353–375.
21. Roussel J. F., Alet I., Fage D., Pereira A. (2004). Effect of space environment on spacecraft surfaces in sun-synchronous environment. *J. Spacecraft and Rockets*, **41**, № 5, 812–820. doi: 10.2514/1.1211
22. Shimamura H., Miyazaki E. (2009). Investigation into synergistic effects of atomic oxygen and vacuum ultraviolet. *J. Spacecraft and Rockets*, **62**, № 2, 241–247. doi: 10.2514/1.31815
23. Shuvalov V. A., Gorev N. A., Tokmak N. A., Kochubei G. S. (2017). Physical simulation of the long-term dynamic action of a plasma beam on a space debris object. *Acta Astronautica*, **132**, 97–102. doi: 10.1016/j.actaastro.2016.11.039
24. Shuvalov V. A., Reznichenko N. P., Tsokur A. G., Nosikov S. V. (2016). Synergetic effects of the action of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation on polymers in the Earth's ionosphere. *High Energy Chemistry*, **50**, 171–176. doi: 10.1134/S0018143916030140
25. Tagawa M., Doi H., Yokota K. (2009). Atomic oxygen concentrators for material exposure acceleration test in low Earth orbit. *J. Spacecraft and Rockets*, **46**, № 2, 226–229. doi: 10.2514/1.30866
26. Tagawa M., Yokota K. (2008). Atomic oxygen induced polymer degradation phenomena in simulated LEO space environment: How do polymers react in a complication space environment. *Acta Astronautica*, **62**, № 2-3, 203–211. doi: 10.1016/j.actaastro.2006.12.043
27. Vezker R., Grossman E., Gouzman I., Eliaz N. (2007). Residual stress effects on degradation of polyimide under simulated hypervelocity space debris and atomic oxygen. *Polimer*, **18**, № 1, 19–24. doi: 10.1016/j.polymer.2006.10.035
28. Waters D. L., Banks B. A., Thorson S. D., de Groh K. K., Miller S. K. (2007). Comparison of the atomic oxygen erosion depth and cone height of various materials at hyperthermal energy. *NASA/TM-2007-214374*, 6 p.
29. Yokota K., Seikyu S., Tagawa M., Ohmae N. (2003). A quantitative study in synergistic effects of atomic oxygen and ultraviolet regarding polymer erosion in LEO space environment. *Proc. 9th Int. Symp. on Materials*, 265–272.
30. Yokota K., Tagawa M. (2007). Comparison polyethylene and polyimide as a fluence monitor of atomic oxygen. *J. Spacecraft and Rockets*, **44**, № 2, 434–439. doi: 10.2514/1.15038
31. Zangwill A. (1988). *Physics at surface*. Cambridge, New-York: Cambridge University Press, 454 p.
32. Zimcik D. G., Maag C. R. (1988). Results of apparent oxygen reactions with spacecraft materials during Shuttle Flight STS-41 G. *J. Spacecraft and Rockets*, **25**, № 2, 162–168. doi: 10.2514/3.25965
33. Zimcik D. G., Wertheimer M. R., Balmain K. B., Tennyson R. C. (1991). Plasma-deposited protective coating for spacecraft applications. *J. Spacecraft and Rockets*, **28**, № 6, 652–637. doi: 10.2514/3.26295

Стаття надійшла до редакції 13.07.2023

Після доопрацювання 31.01.2024

Прийнято до друку 31.01.2024

Received 13.07.2023

Revised 31.01.2024

Accepted 31.01.2024

V. O. Shuvalov, Head of the Department, Dr. Sci. in Tech., the Winner of State Awards of Ukraine, the Laureate of the M. K. Yangel Prize of the Presidium of the NAS of Ukraine

ORCID: 0000-0002-6640-6041

E-mail: vashuvalov@ukr.net

M. I. Pismennyi, Researcher

ORCID: 0000-0002-3287-8745

E-mail: pismennnyi.m.i@nas.gov.ua

M. A. Tokmak, Researcher

ORCID: 0000-0001-9525-4545

E-mail: Tokmak.m.a@nas.gov.ua

S. M. Kulagin, Senior Researcher, Ph. D. in Tech., Senior Research Officer

ORCID: 0000-0002-2862-5809

E-mail: Kulahin.S.M@nas.gov.ua

M. P. Reznichenko, Junior Researcher

ORCID: 0000-0001-6151-4089

E-mail: Riznychenko.M.P@nas.gov.ua

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine
15 Leshko-Popel Str., Dnipro, 49005 Ukraine

SIMULATION SPACECRAFT POLYMERS — ATOMIC OXYGEN INTERACTION AT LOW ORBIT IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

The paper represents procedures developed for the simulation of the interaction of polymers, which are the spacecraft structure materials, with the flows of hyperthermal atomic oxygen (AO) at very low-Earth orbits (VLEOs) by use of high-energy ions of a rarefied plasma. The development is based on laboratory and space test data (the Mir orbital station, the ISS, the Space Shuttle, and Spot 1, 2, 4). The parameters that characterize the physicochemical and dynamic interaction of atomic oxygen flow with the spacecraft structure's polymers are determined, such as erosion yield, solar absorptance, momentum and energy accommodation coefficients, and also erosion depth and surface roughness polymer film. The parameters of the «AO — polymer» interaction are reported as a function of energy and AO fluence. The use of AO ion flows for energies 30...100 eV allows one to simulate an interaction of «AO — polymers» at altitudes 170...300 km (VLEOs) in the Earth's atmosphere.

Keywords: polymer, fluence, erosion depth, surface roughness, atomic oxygen, momentum and energy transport coefficients.

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.069>

УДК 528.83/.88:[550.8.05:(55:004)]:504:(627/.628.8:624.1)](477.41)

О. Т. АЗИМОВ¹, голов. наук. співроб., д-р геол. наук, старш. наук. співроб.

ORCID 0000-0002-5210-3920

E-mail: azimov@casre.kiev.ua

О. В. ТОМЧЕНКО¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID 0000-0001-6975-9099

E-mail: tomch@i.ua

О. Л. ШЕВЧЕНКО², голов. наук. співроб., д-р геол. наук, старш. наук. співроб.

ORCID 0000-0002-5791-5354

E-mail: shevch62@gmail.com

С. І. КІРЕЄВ³, ген. дир.

ORCID 0000-0001-7059-3655

E-mail: kireev@ecocentre.kiev.ua

¹ Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі

Інституту геологічних наук Національної академії наук України»

вул. Олеся Гончара 55-6, Київ, Україна, 01054

² Український гідрометеорологічний інститут Державної служби України

з надзвичайних ситуацій та Національна академія наук України

Проспект Науки 37, Київ, Україна, 03028

³ Державне спеціалізоване підприємство «Екоцентр»

вул. Шкільна 6, Чорнобиль, Київська обл., Україна, 07270

МОНІТОРИНГ ГІДРОРЕСУРСІВ РАДІАЦІЙНО ЗАБРУДНЕНИХ ОСУШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗА КОМПЛЕКСОМ ДАНИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМАНЬ І НАЗЕМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ (У КОНТЕКСТІ РЕГІОНАЛЬНИХ ЗМІН КЛІМАТУ)

На прикладі території Прип'ятської лівобережної осушувальної системи Чорнобильської зони відчуження для регіону українського Полісся було обґрунтовано прогноз настання наприкінці 2022 р. багатоводної фази (11 років) в межах повного гідрологічного циклу (22 роки), який згодом виправдався. Ознаками перебігу такого процесу є: 1) відносно збільшення сумарної кількості атмосферних опадів за період вересень — грудень у 2022 р. порівняно з аналогічним періодом попередніх років у межах усієї лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять (за даними платформи ERA5); 2) зростання ступеня обводнення території осушувальної системи — як міждамбової ділянки, так і району, що розташований північно-східніше старої дамби (це засвідчує аналітичне порівняння результатів тематичного дешифрування матеріалів, отриманих з супутника «Sentinel-2» від 02.05.2023 р., та даних космічного знімання різними апаратами за квітень-травень попередніх років); 3) встановлені факти рясних дощів, що пройшли у квітні 2023 р. у досліджуваному регіоні, затоплення, підтоплення значних площ, наводок на його території у квітні-травні цього ж року.

Цитування: Азімов О. Т., Томченко О. В., Шевченко О. Л., Кіреєв С. І. Моніторинг гідроресурсів радіаційно забруднених осушувальних систем за комплексом даних космічних зніманих і наземних спостережень (у контексті регіональних змін клімату). *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 2 (147). С. 69—92. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.069>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Як наслідок, порівняно з періодом 2015—2021 рр., тобто вже після припинення постійного функціонування польдерної насосної станції в районі лівобережного польдера, у 2022 р. значно зросли обсяги активності ^{90}Sr , що за розрахунками могли бути винесеними зі стоком з цієї території: у 4 рази порівняно з 2021 р., у 20 разів — порівняно з 2020 р. Отже, зважаючи на зазначені вище гідрометеорологічні фактори, обґрунтованим є прогноз щодо зростання обсягів активності ^{90}Sr , винесених зі стоком з басейну лівобережного польдера до р. Прип'ять як у 2023 р., так і в наступні 2–3 роки.

Ключові слова: Чорнобильська зона відчуження, лівобережна осушувальна система, гідроресурси, моніторинг, дистанційні методи, поверхневий стік, винесення радіонуклідів.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ, МЕТИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Радіаційно-екологічний моніторинг довкілля у межах забруднених радіонуклідами територій передбачає створення відповідної інформаційно-технологічної системи для оцінювання радіаційної обстановки, виявлення тенденцій в її змінах та для подальшого прогнозування на основі регулярних спостережень. Для удосконалення структури і методичних основ моніторингу як одну з важливих його складових необхідно залучати й аерокосмічний сегмент. На сьогоднішній день в Україні є реальна можливість регулярно отримувати аерокосмічну інформацію у вигляді багатоспектральних зображень місцевості у видимому, інфрачервоному (ІЧ) та радіодіапазонах електромагнітних хвиль (ЕМХ) з просторовим розрізненням від одиниць метрів до одиниць кілометрів. За останні роки отримали подальший розвиток науково-методичні основи інтерпретації даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і вирішення на їхній основі різноманітних тематичних завдань природокористування і геоєкології (зокрема, у сфері кліматології, гідрометеорології, водного, лісового, сільського господарств, геології тощо). Розроблено і стало доступним широкому колу користувачів високорозвинуте програмне забезпечення, яке дозволяє ефективно здійснювати оброблення та аналіз даних дистанційних знімків і документувати їхні результати. Отримали широкий розвиток геоінформаційні системи і технології, навігаційні системи, зокрема Глобальна система позиціонування (Global Positioning System — GPS), інтернет-, телематичні (доступ і передача інформаційних ресурсів на відстані) і краудсорсингові (з застосуванням можливостей мобільного зв'язку) технології тощо.

У межах Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) одним з головних завдань системи контролю радіаційної обстановки і раннього попередження пов'язаної з нею небезпеки є вивчення просторово-часових змін та визначення на цій основі районів з тенденцією до погіршення радіаційного стану, а також імовірних джерел забруднення. Повною мірою це стосується й гідрологічних систем і водних ресурсів території Зони. Таким чином, роботи із використанням даних ДЗЗ провадилися за напрямом експериментальних моніторингових досліджень та оцінювання впливу кліматичних змін на водні ресурси ЧЗВ. Для дистанційної оцінки у межах Зони обрано територію (полігон), яку наразі неможливо досліджувати польовими методами, оскільки, по-перше, вона має високий рівень радіаційного забруднення, по-друге — як прикордонну її закрито для доступу цивільним особам після початку повномасштабної російської агресії. Крім того, вона була хаотично замінована під час тимчасової окупації рашистами.

Отже, головною **метою роботи** є виявлення проявів впливу антропогенної діяльності та глобальних кліматичних змін на поширення водної поверхні, річного розподілу, обсягів поверхневого стоку і винесення з ним радіонуклідів на території, недоступній для інших, крім дистанційних, методів досліджень. **Об'єктом досліджень** є дослідний полігон, що у межах ЧЗВ належить до лівобережної Прип'ятської осушувальної системи. Зважаючи на наявність об'єктів природного й антропогенного походження, район цієї системи є своєрідним, досить складно побудованим природно-територіальним комплексом з переважанням елементів водно-болотної екосистеми. При цьому міждамбова площа Прип'ятської системи (між «старою» та «новою» лівобережними дамбами) є основною ділянкою великомасштабних досліджень (рис. 1).

Актуальність і постановка проблеми досліджень просторово-часових змін у чутливій до них системі «поверхневі води — суходіл» аргументується необхідністю розробки ефективних підходів до захисту відкритих водних об'єктів території від вторинного забруднення техногенними радіонуклідами. Отож, з-поміж **комплексу завдань** у вирішенні проблеми важливим є виконання ретроспективного аналізу стану поширення водної поверхні на лівобережній Прип'ятській системі за матеріалами дистанційних знімків минулих років, за наявними актуальними даними — поточного стану, а також оцінювання ефективності експлуатації водоохоронного комплексу в її межах, зокрема після припинення у 2015 р. постійного функціонування розташованої тут польдерної насосної станції (ПНС). Здійснення відповідних розвідок для позитивного досягнення головної мети роботи, отримання конкретних результатів і є завданням цього дослідження.

ВИХІДНІ МАТЕРІАЛИ

Стосовно отримання важливої вихідної інформації з багатоспектральних космічних знімків (КЗ) високої й навіть середньої просторової розрізненності вкажемо, що в ідеалі з їхнім використанням можна виявляти характер просторового розподілу та площу водної поверхні (дзеркало води) на час певного гідрологічного явища (повінь, паводок, межінь тощо), визначати температуру поверхневого шару води, глибину та об'єм водойми (з обов'язковою завіркою глибини на місцевості або за наявності цифрової моделі рельєфу земної поверхні), встановлювати області (площі) тривалого накопичення води, можливого підтоплення, місця розмиву водоохоронних дамб, досліджувати відповідні супутні процеси, оцінювати характер заростання затопленої частини заплави та широких русел водотоків [1–5, 7, 9–13, 15–19, 22–24, 26–28, 32–38]. Останнє дуже важливо для визначення коефіцієнтів шорсткості і проточності русел. Шорсткість поверхні заплави значною мірою зумовлює швидкість проходження паводкових вод, а ступінь проточності русел річок та каналів визначає гідрохімічний режим та режим рівня, а

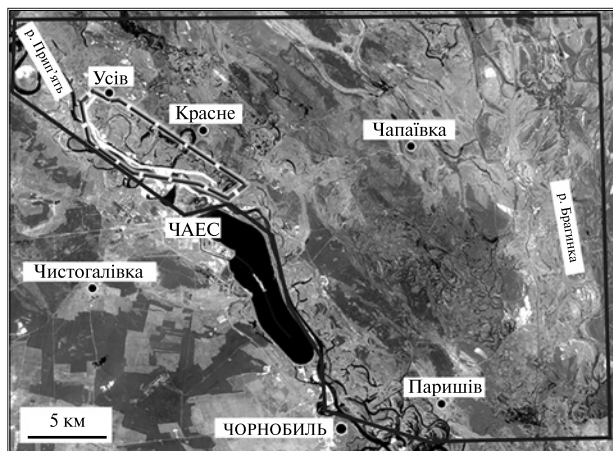


Рис. 1. Територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах досліджуваної ЧЗВ (окреслено контуром чорного кольору), та міждамбова ділянка детального вивчення (пунктирний контур). Виділяються гідрографічна мережа і заболочені площі, ерозійна мережа та площі відкритих ґрунтів і поверхневих відкладів різного мінералогічного складу [3]. (Знімок з супутника IRS-1D від 29.04.1997 р., 1-й канал, панхроматичний, 0.50... 0.75 мкм)

також впливає на співвідношення поверхневої та підземної балансових складових, а головне — на темпи водообміну та інтенсивність самоочищення вод від радіонуклідів (без урахування їхнього природного розпаду). Зниження ступеня проточності викликає збільшення рівнів води у багатоводні періоди гідрологічного циклу, подальше заростання русла, евтрофікацію та сапробність водотоків.

Тобто, дані ДЗЗ, представлені багатоспектральними КЗ, стають в нагоді при вирішенні завдань оцінювання та прогнозування водного вносу радіонуклідів із затоплених заплави під час повеней різної водозабезпеченості, оцінювання об'ємів води у водоймах, їхнього балансу, а також при визначеннях ефективності таких водоохоронних споруд, як протиповеневі дамби тощо. Для цього достатньо мати дистанційні знімки на календарні дати максимальних рівнів води в річці для повеней різної забезпеченості.

Таким чином, для досягнення поставленого й означеного вище завдання у роботі використовувалися багатоспектральні КЗ, отримані протягом тривалого часового періоду (переважно

у квітні-травні) із супутників «Landsat-4/7» (від 16.04.1984 р., 20.04.2003 р. і 14.04.2004 р.), SPOT-3/4 (від 06.05.1986 р., 18.04.1994 р., 23.08.1995 р. і 14.07.1998 р.), «WorldView-2» (від 26.05.2018 р. і 06.04.2022 р.) та «Sentinel-2» (від 02.05.2023 р.). Територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах ЧЗВ, а також прилеглі до неї ділянки вказаними КЗ охоплені повністю. Зональні знімки космічних апаратів (КА) «Landsat-4/7» мають просторову розрізненність 30 м/пкл (за винятком зображень у дальній ІЧ-зоні спектру ЕМХ, знімки SPOT-3/4 — 20 м/пкл, а знімки «Sentinel-2» — 10 м/пкл (зображення у видимому й одному з ближніх ІЧ-діапазонів, канал В8). Залучені до роботи багатоспектральні КЗ супутника «WorldView-2» в оригіналі мають просторову розрізненність 0.5 м/пкл. Проте задля отримання порівнянних результатів з матеріалами космічного знімання іншими КА, здійсненого у попередні роки, її було цілеспрямовано генералізовано до 6 м/пкл.

Для створення дистанційної основи території Прип'ятської лівобережної осушувальної системи оглядового масштабного рівня, проте високої просторової (у панхроматичного зображення — 10 м/пкл, у надирі — 5.6 м/пкл) і радіометричної розрізненності, використано КЗ IRS-1D від 29.04.1997 р. (див. рис. 1).

Результати, отримані на основі використання даних космічних зніманих земної поверхні, є інформативними для вирішення завдань з оцінювання ступеня перезволоження території та об'ємів води у наявних водоймах (особливо за останній період часу — під час функціонування та після виведення з режиму постійної роботи ПНС на лівобережній Прип'ятській системі), а також з визначення ефективності таких водоохоронних споруд, як протиповеневі дамби тощо. Для цього є теоретичне підґрунтя, що базується на відомостях про специфіку взаємодії електромагнітних хвиль різного діапазону з водною поверхнею. І насамперед це стосується оптичного випромінювання. Як відомо [12, 29], поглинання світлового потоку чистою водою мінімальне у видимій частині спектру (близько 0.47 мкм). Натомість у діапазоні понад 0.6 мкм це поглинання дуже істотно зростає.

Вже у ближньому інфрачервоному діапазоні спектру води озер, річок і морів (особливо чисті) майже повністю поглинають світловий потік. Розсіювання ж зі збільшенням довжини ЕМХ значно зменшується, при цьому зменшується й глибина проникнення сонячних променів. У дальньому ІЧ- (тепловому) діапазоні (8...14 мкм) поведінка води аналогічна до поведінки абсолютно чорного тіла, яке поглинає всю енергію потоку випромінювання, що падає на нього, і виділяє її залежно від власної температури. Таким чином, на даних ДЗЗ, зроблених в ІЧ-зоні ЕМХ, непрогріта водна поверхня чітко виділяється, і на вузькоспектральних знімках виглядає чорною.

Разом з тим наявні у воді різноманітні домішки (органічні та неорганічні речовини) впливають на відбитий потік випромінювання. Їх об'єднують у три основні групи [30]. Наявність у воді завислої речовини (твердий стік) зумовлює дуже сильне розсіювання в ній світла, що загалом не залежить від довжини хвилі випромінювання. Проте у видимій частині спектру зі збільшенням концентрації у водному середовищі завислої твердої фракції відзначається збільшення її яскравості [28]. Однак стосовно цієї групи домішок потрібно зазначити таке. На території досліджень ймовірна наявність частинок глинистих мінералів, піску лише у потоках, що проходять через проран в одній з дамб та ПНС, або ж у воді безпосередньо прилеглих до них локальних ділянок водойм. Переважна ж більшість поверхневих водних об'єктів є або замкненими, або швидкість потоків у їхніх межах не призводить до видимих змудень.

Розчинні у воді органічні сполуки (гелі) сильно поглинають ультрафіолетові та блакитні промені. Фітопланктон утворює третю, особливу групу завислої речовини. Необхідний в його складі для фотосинтезу пігмент завдяки хлорофілу дає дуже інтенсивні смуги поглинання у блакитній і червоній зонах спектру ЕМХ, за якими й визначається наявність власне фітопланктону у воді [6, 22]. Проте у весняний період року для досліджуваної нами території зазвичай притаманним є відсутність у її поверхневих водах органічних речовин.

Зазначені вище особливості взаємодії ЕМХ з водою та наявними в ній речовинами і сполуками враховано нами при виборі інформативних для вирішення поставлених завдань багатоспектральних КЗ у певних спектральних каналах та при застосуванні відповідної методики.

Для вибірки, збору та накопичення даних про кількість атмосферних опадів, що випадали на територію досліджень, використано можливості платформи ERA5 [31]. Просторова розрізненість даних ERA5 для регіону досліджень — лівобережній частині водозбору басейну р. Прип'ять — становить 11.132×11.132 км. За допомогою ERA5 отримано таку інформацію про опади: це накопичена рідка і замерзла вода, зокрема, вода дощів та снігу, що випадають на поверхню Землі. Загалом це сума масштабних опадів (total precipitation, тобто тих опадів, що генеруються масштабними погодними умовами, такими як області низького тиску та холодні фронти) та конвективних опадів (генеруються конвекцією, що виникає, коли повітря на нижніх рівнях атмосфери виявляється теплішим і менш щільним за повітря вгорі, внаслідок чого воно і піднімається). Величина кількості опадів не включає туман, росу або опади, які випаровуються в атмосфері до того, як потраплять на поверхню Землі. Ця величина є накопичувальною у період від початку часу прогнозу до кінця кроку прогнозу.

Одиницями вимірювання опадів є товщина у метрах. Це товщина, яку мав би шар води у центрі комірки двовимірної сітки, якщо б усю кількість води, що випала в межах комірки за умови рівномірного розподілу випадіння, сумувати й віднести до цього центру. Загалом у перспективі досліджень слід бути обережним, порівнюючи змінні величини моделі з результатами конкретних наземних спостережень кількості атмосферних опадів, оскільки останні часто є локальними для певної точки у просторі та часі, і не є середніми значеннями для комірки сітки моделі чи часового кроку моделі.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У дослідженнях застосовувалася методика комп'ютерного оброблення космічних знімків та

аналізу одержаних результатів, яку було цілеспрямовано розроблено для вивчення поверхневих водойм у межах суходолу [2, 3, 10, 11, 17, 19, 21, 22, 26, 34—38]. Зазначимо, що відповідні процедури провадилися із використанням різних відомих програмних продуктів, серед яких найширше до роботи залучалися пакети програм ERDAS Imagine, географічні інформаційні системи (ГІС) MapInfo Professional, ArcGIS та деякі інші. Перед обробкою знімків усі вони були прив'язані до прямокутної системи координат Гаусса — Крюгера (1942 р.) не менш ніж за 20 точками за допомогою програми ERDAS Imagine. Це дозволило геометрично скоригувати усі КЗ з точністю близько 1 пкл.

З метою виконання адекватного аналітичного порівняння площових об'єктів, дешифрованих на знімках високої розрізненості КА «WorldView-2», з об'єктами, що виділялися за знімками нижчої розрізненості, отриманими КА «Landsat-4/7», SPOT-3/4 і «Sentinel-2», просторову розрізненість зображень «WorldView-2» перед процедурою класифікації попередньо було загублено (генералізовано) до 6 м/пкл засобами спеціальних програмних продуктів.

Крім того, для урахування впливу різних умов зйомки на інтенсивність спектральних яскравостей об'єктів на земній поверхні (кут нахилу Сонця, прозорість атмосфери тощо) виконувалась радіометрична корекція КЗ. Це дало змогу привести різночасові знімки до рівня одного з них, після чого стало можливим проводити їхнє зіставлення. З метою радіометричної корекції КЗ бралися до уваги природні об'єкти території досліджень, спектральні яскравості яких більшу частину року можна вважати постійними.

Для чіткого виявлення за багатоспектральними супутниковими знімками відкритих водних поверхонь на фоні рослинності, відкритого ґрунту або інших відслонених осадових утворень у практиці дистанційних досліджень традиційно використовуються значення нормалізованого різницевого водного індексу *NDWI* (Normalized Difference Water Index) та відповідним чином отримані й візуалізовані зображення. Показник *NDWI* було запропоновано С. К. Макфітерсом у 1996 р. [34]. За допомогою *NDWI* можливе не

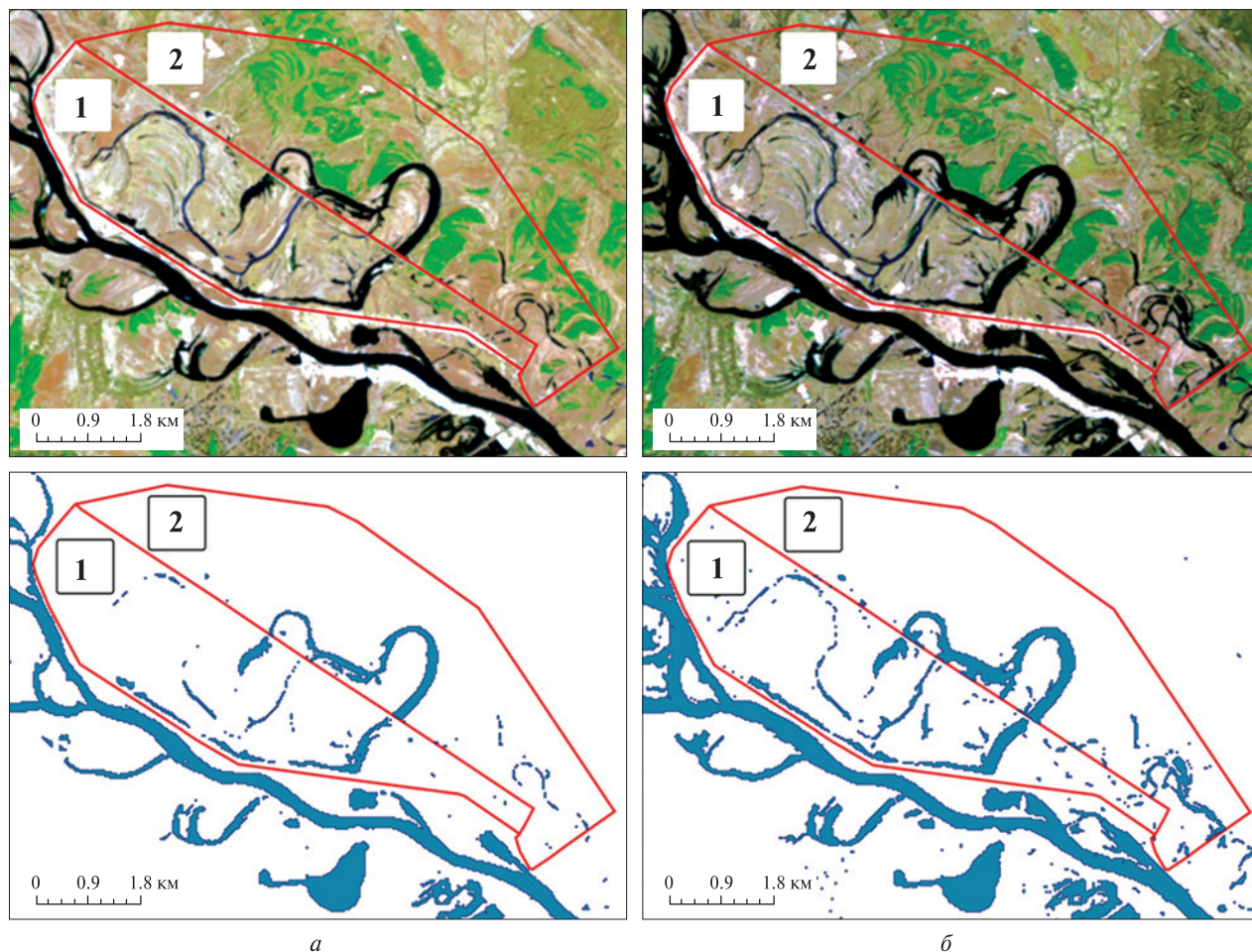


Рис. 2. Космічні знімки «Landsat-7 ETM+» (*а* — станом на 20.04.2003 р., *б* — станом на 14.04.2004 р.) та дешифровані з їхнім використанням відкриті водні поверхні (нижній ряд) на лівобережжі р. Прип'ять. Червоним контуром показано межі ділянок дослідження: **1** — ділянка між старою і новою дамбами, **2** — ділянка північно-східніше від старої дамби; синій колір — площі, зайняті відкритою водною поверхнею. Знімки синтезовані: канал 543 — 5-й, середній ІЧ-канал (1.55...1.75 мкм), 4-й, ближній ІЧ-канал (0.75...0.90 мкм) і 3-й, червоний канал (0.63...0.69 мкм)

лише ефективно виділення водних об'єктів на площі, наявність яких на зображенні неначе «посилюється», але добрі результати дає й моніторинг найменших змін як у їхній просторовій конфігурації, так і у власне водному середовищі (наприклад, поява фітопланктону, змуленості тощо) за різночасовими знімками.

З урахуванням переваги в інформативності щодо картування «дзеркала води» зображень ближнього інфрачервоного та зеленого спектральних осередків *NDWI* розраховується з використанням їхньої комбінації за формулою (1):

$$NDWI = \frac{I_G - I_{NIR}}{I_G + I_{NIR}}, \quad (1)$$

де I_{NIR} , I_G — відбивна здатність об'єкта у ближній ІЧ-області (760...900 нм) та у зеленій області спектру (530...590 нм) відповідно.

Вибір вказаних діапазонів довжин ЕМХ зумовлений тим, що в зеленій області спектру водні об'єкти характеризуються максимальними значеннями відбивних характеристик, натомість у ближній ІЧ-зоні — мінімальними, оскільки в цій області наземна рослинність та відкритий ґрунт

мають максимальні значення. Таким чином, на підставі розрахунку за вказаним вище рівнянням (1) водні об'єкти вирізняються додатними значеннями *NDWI*, тоді як ґрунт та рослинність мають нульові або ж від'ємні його значення. Це дозволяє легко відділити поверхневі водойми від площ, у межах яких є рослинний покрив.

Отож, у роботі за даними багатоспектральних КЗ виконувалися розрахунки *NDWI*. При інтерпретації отриманих значень *NDWI* бралася до уваги, що вони мають відповідати таким наземним об'єктам:

- 0.2...1 — відкритій водній поверхні;
- 0.0...0.2 — площам суходолу, що зазнавали затоплення, (пере)зволоженням його площам;
- -0.3...0.0 — площам з помірно висушеним ґрунтом, неводним поверхням;
- -1... -0.3 — площам суходолу, що зазнали посухи, неводним поверхням.

Проте, враховуючи головне завдання досліджень, територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах ЧЗВ класифікувалася на два основних класи просторових об'єктів: відкрита водна поверхня і суходіл. До класу останнього, крім власне площ непокритого рослинністю ґрунту, піску, інших осадових утворень та задернованих, заліснених площ, або ж таких, що зайняті різновидовим рослинним покривом різної щільності, також належать різноманітні техногенні об'єкти (бетонні, залізні, дерев'яні конструкції, споруди тощо).

Моніторинг змін у системі «поверхневі води — суходіл» засобами ДЗЗ/ГІС-технологій на території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи здійснювався у межах двох відокремлених техногенними спорудами (дамбами) ділянок, що простяглися з північного заходу на південний схід. Це основна ділянка у межах ЧЗВ площею 15.424 км², що обмежена «тілами» старої й нової дамб, і таким чином розташована між ними (ділянка № 1), та ділянка, що лежить на північний схід від старої дамби (ділянка № 2) і має площу 15.204 км² (рис. 2). Отож, за своїми геометричними параметрами ці дві ділянки, що межують між собою, є тотожними. З метою чіткої ідентифікації їхніх контурів (а отже і площ) на космічних знімках різних років, одержаних

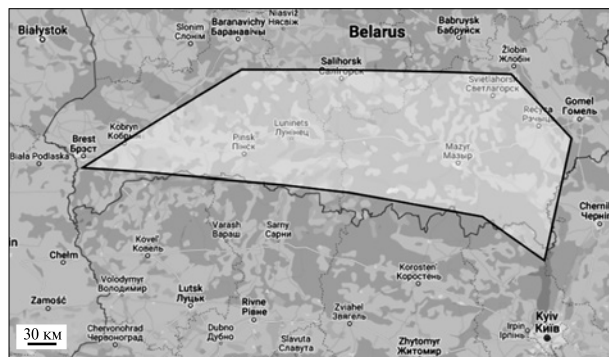


Рис. 3. Територія лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять (полігон світло-сірого кольору), на якій аналізувалися статистичні дані про атмосферні опади

з різних КА, та для картування і отримання порівнянних результатів для досліджуваних природних об'єктів у їхніх межах засобами ГІС було створено відповідні векторні «маски» контурів. При цьому контур і площа міждамбової ділянки для всіх опрацьованих КЗ були ідентичними. Натомість для аналізу гідрологічної ситуації на ділянці північно-східніше від старої дамби за знімками 1984, 1986, 1994 і 1995 рр. розглядалася територія площею 110.89 км². Це значно перевищує площу в 15.204 км², що деталізувалася за даними ДЗЗ 2003, 2004, 2018, 2022 і 2023 рр.

Під час аналізу та часового моніторингу кількості атмосферних опадів у регіоні Полісся, обсяги яких, на наш погляд, потенційно могли впливати на гідрологічний режим території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи, до уваги бралися випадіння у межах лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять. Переважно це територія південної частини Республіки Білорусь (рис. 3). Її площа становить 49872 км².

Для вибірки статистичних даних щодо кількості атмосферних опадів з бази даних, доступ до якої надається платформою ERA5 [31], саме для цієї території за конкретними географічними координатами та за попередньо визначеними місяцями та роками було створено програмний алгоритм та відповідну підпрограму (автор А. А. Андреев [26]). Певні роки визначалися роками отримання КЗ супутниковими система-

ми, які залучені до досліджень. При цьому брався до уваги також кожен з років, що передували року знімання. Протягом кожного з років, дані за якими мали аналізуватися, визначалися групи місяців по два в кожній. Підпрограмою для взятої до розгляду території розраховувалося не середнє значення кількості атмосферних опадів по кожному з двох місяців, а їхня сума за ці два місяці. Місяці було згруповано після проведення численних розрахункових ітерацій з їхніми комбінаціями від двох до чотирьох місяців у групі, з часовим зміщенням на 1...2 місяці таким чином, щоб встановити їхню інформативність щодо впливу опадів на формування відносної водності території досліджень.

Оскільки з допомогою платформи ERA5 відібрано масив даних із сумарної кількості атмосферних опадів по території лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять, що вимірюється у метрах, ці дані було перераховано відповідно до прийнятих у метеорології міліметрів шару води. Для цієї процедури використано базу даних метеорологічних показників метеостанції м. Чорнобиль, яка є найближчою до району лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах ЧЗВ. У межах території лівобережної частини водозбору опади підсумовувалися за 402 комірками розміром 11.132×11.132 км і площею 123.921 км² кожна.

Своєрідне калібрування сумарної кількості опадів згідно з даними чорнобильської метеостанції здійснювалося по кожному року окремо, визначався відповідний перехідний коефіцієнт. Його врахування дозволило розрахувати кількість атмосферних опадів у міліметрах шару води, що випала, для кожної з груп місяців у конкретному році. Таким чином, дані про кількість опадів у межах взятої до уваги території лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять, що формують водний баланс поверхневого стоку лівобережної Прип'ятської осушувальної системи, стали сумірними з аналогічними параметрами метеостанції м. Чорнобиль, які загалом носять локальний характер, а отже стали звичними для сприймання фахівцями-метеорологами.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

На основі аналізу матеріалів комп'ютерного оброблення багатоспектральних КЗ отримано тематично нові адекватні результати, що стали інформативними у процесі подальшої оцінки ефективності експлуатації водоохоронного комплексу на лівобережній Прип'ятській системі. Найперше — встановлено розподіл закартованих за даними космоснімків площ, що в різні роки у межах кожної з виділених окремих ділянок деталізації були зайняті водною поверхнею або суходолом. Це ділянки між старою та новою дамбами (ділянка № 1) та ділянка на північний схід від старої дамби (ділянка № 2) (див. рис. 2). Використання дешифрованих КЗ дозволило визначити точне просторове розміщення, контури та площі водоохоронних об'єктів, що були споруджені вже після останніх доповнень та видання топографічних карт місцевості, зроблених у 1984—1989 рр.

Зокрема, за результатами проведених раніше досліджень із застосуванням КЗ встановлено [2, 17—19], що на площі старого польдера (північно-східніше і гіпсометрично вище старої дамби) протягом 1994—1998 рр. відбувалася затримка значних обсягів поверхневого стоку. Це призвело до підтоплення та заболочення території, зростання площі водної поверхні та підвищеного винесення радіонуклідів з відповідної ділянки водозбору у р. Прип'ять. Тобто, за період після введення в експлуатацію лівобережного водоохоронного комплексу (зокрема нової дамби у 1992 р., функціонування ПНС тощо) набули істотного значення побічні негативні ефекти, що безперечно знизили загальний позитивний результат від локалізації радіонуклідного забруднення на огороженій частині заплави.

Затоплення у верхньому б'єфі старої дамби за рахунок підтоку з розташованого вище водозбору відбувалось щороку, збільшуючи фільтрацію через тіло старої дамби у міждамбову область і таким чином розширюючи площі водних об'єктів (рис. 4). Саме тому і ПНС, починаючи з 1994 р., працювала щороку, скидаючи забруднену воду з міждамбової ділянки через обвідний канал та проран у дамбі № 7 у р. Прип'ять. Тим

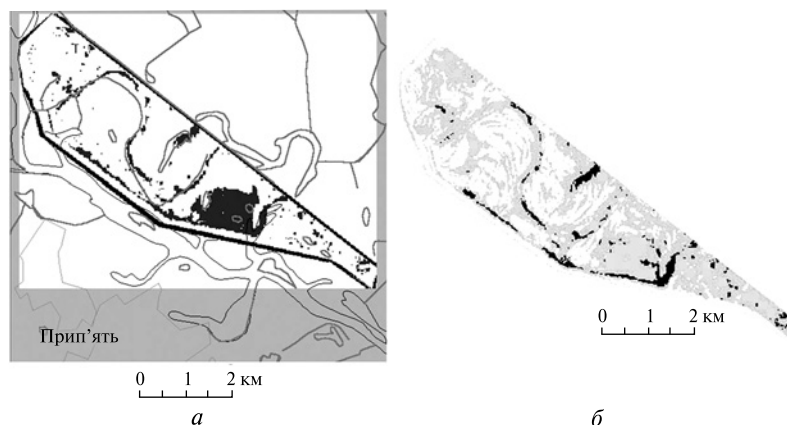


Рис. 4. Ділянка між старою та новою лівобережними дамбами у межах Прип'ятської осушувальної системи (окреслена контуром чорного кольору) з виділенням площ відкритої водної поверхні та суходолу за матеріалами багатоспектрального космічного знімання з супутників SPOT-3/4: *а* — станом на 23.08.1995 р. (дзеркало води — темний колір, згідно з [19]), *б* — сумарне затоплення міждамбової ділянки за час будівництва нової лівобережної дамби (з 1994 по 1998 рр.) за даними зйомки від 18.04.1994 р., 23.08.1995 р. та 14.07.1998 р. [18]: білий колір — площі суходолу, що не були зайняті водою у 1994—1998 рр., сірий колір — площі, що періодично були під водою у 1994—1998 рр.; темний колір — площі, що постійно були під водою у 1994—1998 рр.

самим робота ПНС призводила до додаткового затоплення площі у верхньому б'єфі старої дамби.

У результаті здійсненого у 2001—2004 рр. відповідно до рекомендації [18] розчищення каналів і реконструкції пропускних споруд на лівобережній Прип'ятській осушувальній системі зафіксовано спочатку збільшення (як і прогнозувалось — у зв'язку із збільшенням стоку), а потім зменшення винесення ^{90}Sr . Концентрація ^{90}Sr у гирлі каналу МК-5 (у місці зниження на 0.95 м порогу дамби № 7 узимку 2000—2001 рр.) значно зменшилась від самого початку реконструкції [6]. Завдяки останній збільшення стоку з лівобережного польдера у три рази, порівняно з 2000 р., призвело до збільшення водного винесення цього радіонукліду лише у 1.6 рази. У відносних одиницях (31 % від винесення ^{90}Sr з території ЧЗВ) це значення також не стало аномальним (у порівнянні з 40 % у 1999 р.). У листопаді 2001 р. рівень води у верхньому б'єфі дамби № 7 знизився на 2 м (з 106 до 104 м Балтійської системи висот) [6]. З 2002 р. величини винесення ^{90}Sr у р. Прип'ять з лівобережного польдера стали більш пропорційними до обсягів стоку.

Зменшення стоку через лівобережний польдер опосередковано підтверджують результати комп'ютеризованого дешифрування КЗ, зокре-

ма за квітень 2003 і 2004 рр., тобто за один з місяців інтенсивного обводнення і перезволоження території ЧЗВ (див. рис. 2). Згідно з ними [3, 27] площа відкритої водної поверхні на зазначеній території значно зменшилась (у декілька разів, а то майже й на порядок) порівняно з аналогічним періодом попередніх років [2, 17—19].

Так, дзеркало води на ділянці північно-східніше старої дамби закартовано на площі близько 0.76 км² станом на 20.04.2003 р. та приблизно 1.54 км² станом на 14.04.2004 р. Натомість на міждамбовій ділянці відкриту водну поверхню станом на 20.04.2003 р. дешифровано на площі приблизно 0.66 км², а станом на 14.04.2004 р. — на площі 1.16 км² (табл. 1). Ці дистанційно отримані результати засвідчують правомірність виконаних на початку 2000-х років різноманітних гідротехнічних заходів (ліквідація дамби № 7, розчищення каналів, конструктивні зміни у водопропускних об'єктах тощо), що були спрямовані на радіоекологічно зумовлене покращення гідрологічної ситуації у межах лівобережної Прип'ятської системи.

Весняний водний баланс території формується за рахунок атмосферних опадів кінця попереднього року (листопад — грудень) та початку поточного (січень — квітень). У цей період тем-

пература атмосферного повітря низька, а його вологість підвищена, часто є наявність якогось снігового покриву, випаровування із земної поверхні незначне. Цим пояснюється зменшення зволоженості та площі водної поверхні на території досліджень навесні 2003 р., оскільки перед цим, у листопаді — грудні 2002 р., випало лише 90.382 м/54 мм) опадів (тут і далі: відповідно опади в сумі на всій взятій до розгляду території лівобережного водозбору басейну р. Прип'ять, у

метрах, та шару води, що випала у міліметрах, як класичному вираженні кількості опадів у метеорології), що менше порівняно з іншими роками (табл. 2, рис. 5, 6). Зокрема, у межах міждамбової ділянки 20 квітня 2003 р. площа дзеркала води становила 0.66 км². Також незначні опади зафіксовано й у січні — лютому 2003 р. (97.127 м/54 мм) та березні — квітні (112.82 м/62 мм).

Схожа ситуація спостерігалася й у 2004 р., коли у березні — квітні цього року випало

Таблиця 1. Площі відкритої водної поверхні та суходолу у межах окремих ділянок водозборів лівобережжя р. Прип'ять, що визначені за матеріалами супутникових знімків 2003, 2004, 2018, 2022 і 2023 рр.*

Дата зйомки	Міждамбова ділянка (1)		Ділянка на північний схід від старої дамби (2)
	площа водної поверхні, км ²	площа суходолу, км ²	площа водної поверхні, км ²
20.04.2003 р.	0.66	14.77	0.76
14.04.2004 р.	1.164	14.26	1.54
26.05.2018 р.	5.414	10.01	3.64
06.04.2022 р.	1.93	13.494	1.37
02.05.2023 р.	3.379	12.045	1.536

Примітка. Результати 2003 і 2004 рр. — за даними знімків з КА «Landsat-7», 2018 та 2022 рр. — з супутника «WorldView-2», 2023 р. — з КА «Sentinel-2»

Таблиця 2. Статистичні значення суми атмосферних опадів у межах усієї території лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять (див. рис. 3), та в перерахунку на мм шару води, що випала, по роках і місяцях (складено з використанням даних платформи ERA5 [31])

Місяці	Сума атмосферних опадів, м / кількість опадів (шар води, що випала), мм						
	2002 р.	2003 р.	2004 р.	2017 р.	2018 р.	2021 р.	2022 р.
Січень-лютий	134.866/ 80	97.127/ 54	171.399/ 112	115.973/ 63	114.02/ 68	176.536/ 103	158.809/ 93
Березень-квітень	109.365/ 65	112.82/ 62	127.203/ 83	170.332/ 92	118.462/ 71	135.249/ 79	155.128/ 91
Травень-червень	173.714/ 104	154.374/ 85	159.166/ 104	143.591/ 78	145.213/ 87	212.699/ 125	149.041/ 87
Липень-серпень	137.425/ 82	275.537/ 152	295.653/ 193	217.143/ 117	258.308/ 155	273.584/ 160	187.455/ 110
Вересень-жовтень	222.311/ 132	167.984/ 93	111.938/ 73	227.885/ 123	115.553/ 69	114.59/ 67	256.5/ 150
Листопад-грудень	90.382/ 54	100.96/ 56	154.578/ 101	202.75/ 110	138.574/ 83	137.769/ 81	187.431/ 110
Загалом за рік	868.063/ 518	908.802/ 502	1019.937/ 667	1077.674/ 583	890.13/ 534	1050.427/ 616	1094.364/ 641

127.203 м/83 мм, а напередодні, у листопаді — грудні 2003 р. — 100.96 м/56 мм атмосферних опадів, що є одним з найнижчих показників за цей період, представлений у табл. 2. Отож логічним є те, що за даними ДЗЗ станом на 14.04.2004 р. на міждамбовій ділянці закартовано 1.164 км² поверхні водоєм.

Починаючи з 2014 р. істотного затоплення міждамбової ділянки не відбувалося, що переважно пов'язано із порівняно невеликою кількістю опадів та середніми позитивними температурами холодного періоду 2014—2017 рр. (див. рис. 6). Це сприяло рівномірному розвантаженню поверхневих вод, зокрема шляхом їхньої інфільтрації взимку. У зв'язку із цим у 2015 р. було припинено постійну експлуатацію ПНС на старій лівобережній дамбі, чим усунуто причину додаткового збільшення концентрації ⁹⁰Sr у поверхневих водах верхнього б'єфу дамби. Відповідно істотно зменшились і витрати забруднених радіонуклідами неконтрольованих фільтраційних потоків під тілом нової піщаної дамби до р. Прип'ять.

За даними моніторингових спостережень Державного спеціалізованого підприємства (ДСП) «Екоцентр» винесення ⁹⁰Sr зі стоком з лівобережного польдера у 2015 р. становило 0.006 ТБк, у 2016 р. — 0.02 ТБк [8]. Це істотно менше у по-



Рис. 5. Кількість W атмосферних опадів, перерахована на міліметри шару води, що випала, у межах усієї території лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять у різні місяці 2002, 2003, 2004, 2017, 2018, 2021, 2022 рр. (складено з використанням даних платформи ERA5 [31])

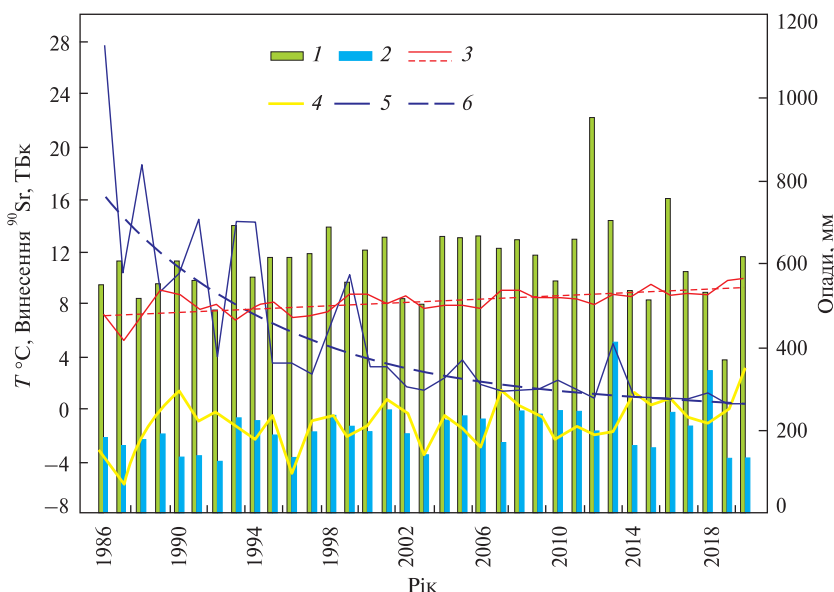


Рис. 6. Зміни водного винесення ⁹⁰Sr р. Прип'ять у створі м. Чорнобиль на фоні змін метеорологічних показників (дані метеостанції м. Чорнобиль): 1 — сумарні річні опади, мм шару води, що випала, 2 — опади холодного періоду року, мм, 3 — середня річна температура та багаторічний тренд її підвищення, °С, 4 — середня температура холодного періоду, °С, 5 — винесення ⁹⁰Sr р. Прип'ять за рік, ТБк, 6 — експоненційний тренд винесення ⁹⁰Sr р. Прип'ять, ТБк

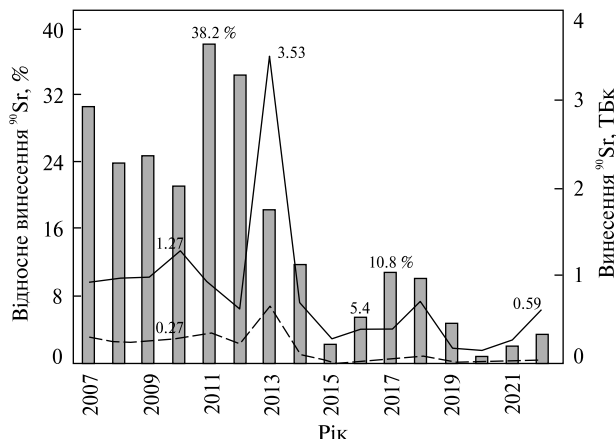


Рис. 7. Динаміка абсолютного (штрихова лінія) та відносного (стовпчики) винесення ⁹⁰Sr з лівобережного польдера. Суцільна лінія — винесення ⁹⁰Sr з території зони відчуження загалом. Дані 2022 р. отримано розрахунковим методом (див. табл. 3)

Таблиця 3. Винесення ⁹⁰Sr зі стоком з лівобережного польдера у межах ЧЗВ у 2009—2021 рр., ТБк (складено з використанням даних ДСП «Екоцентр» [8])

Рік	Винесення	Рік	Винесення	Рік	Винесення
2009	0.24	2014	0.08	2019	0.008
2010	0.27	2015	0.006	2020	0.001
2011	0.34	2016	0.02	2021	0.005
2012	0.21	2017	0.04	2022*	0.02
2013	0.65	2018	0.07		

Примітка. Зірочка * — дані розрахунків з використанням результатів багаторічних спостережень.

рівнянні з винесеною активністю ⁹⁰Sr в одному з попередніх років: 0.65 ТБк у 2013 р. (табл. 3, рис. 7).

Ступінь відносно незначного обводнення ділянки між старою та новою лівобережними дамбами у 2018 і 2022 рр. певною мірою відображають результати тематичного дешифрування КЗ високої просторової розрізненності, отримані КА «WorldView-2» 26 травня 2018 р. та 06 квітня 2022 р. (рис. 8). Зокрема, станом на 26.05.2018 р. тут встановлено площу відкритої водної поверхні, рівну 5.414 км² (див. табл. 1). А це на 28% менше від аналогічного показника 7.56 км², визначеного за КЗ станом на 18.04.1994 р. [2, 17—

19]. При цьому окремі об’єкти поверхневих вод у травні 2018 р. досить рівномірно розмішувалися на міждамбовій ділянці. Натомість у попередні роки їхня кількість помітно збільшувалася в генеральному напрямку з півночі на південь, переважно вони зосереджувалися поблизу нової дамби та району, що примикає до залізничної колії Янів — Славутич (див. рис. 4).

Водночас станом на 26.05.2018 р. (рис. 8, а) спостерігається значне зменшення площі дзеркала води також і на ділянці, що лежить північно-східніше від старої дамби (3.64 км²), якщо порівняти її з такими ж показниками дореконструкційного періоду існування Прип’ятської системи, особливо станом на 16.04.1984 р. (7.07 км²) і 18.04.1994 р. (6.68 км²) [2, 17—19]. Проте варто взяти до уваги, що за космічними знімками 1984, 1986, 1994 і 1995 рр. картування поверхні відкритих водних об’єктів у цьому районі виконано на значно більшій території, що лежить на північний схід від старої дамби і охопила загальну площу 110.89 км². Натомість у 2003, 2004, 2018, 2022 і 2023 рр. аналізувався лише район площею 15.204 км², що безпосередньо прилягає до старої дамби і залізничної колії.

Зазначені процеси зменшення обводнення території, що розглядається, мали чітку тенденцію до пролонгації, принаймні майже до середини весни 2022 р. Це підтверджується результатами вивчення їх засобами ДЗЗ/ГІС-технологій (рис. 8, б). Зокрема, помітніше зменшення площі, що була покрита водною поверхнею в районі досліджень, виявлено за КЗ «WorldView-2» від 06.04.2022 р. Це очевидно з порівняння аналогічних результатів, отриманих унаслідок тематичного дешифрування даних з цього ж КА від 26.05.2018 р. (див. табл. 1). Так, станом на 06.04.2022 р. зайнята водною поверхнею площа на міждамбовій ділянці зменшилася до 1.93 км², а на ділянці на північний схід від старої дамби — до 1.37 км². Водночас площа суходолу у їхніх межах становила 13.494 км² і 17.72 км² відповідно.

Наведені результати демонструють зв’язок із попереднім посушливим періодом 2015—2019 рр. та аномально теплою зимою 2019—2020 рр., що призвело до повсюдної рецесії рів-

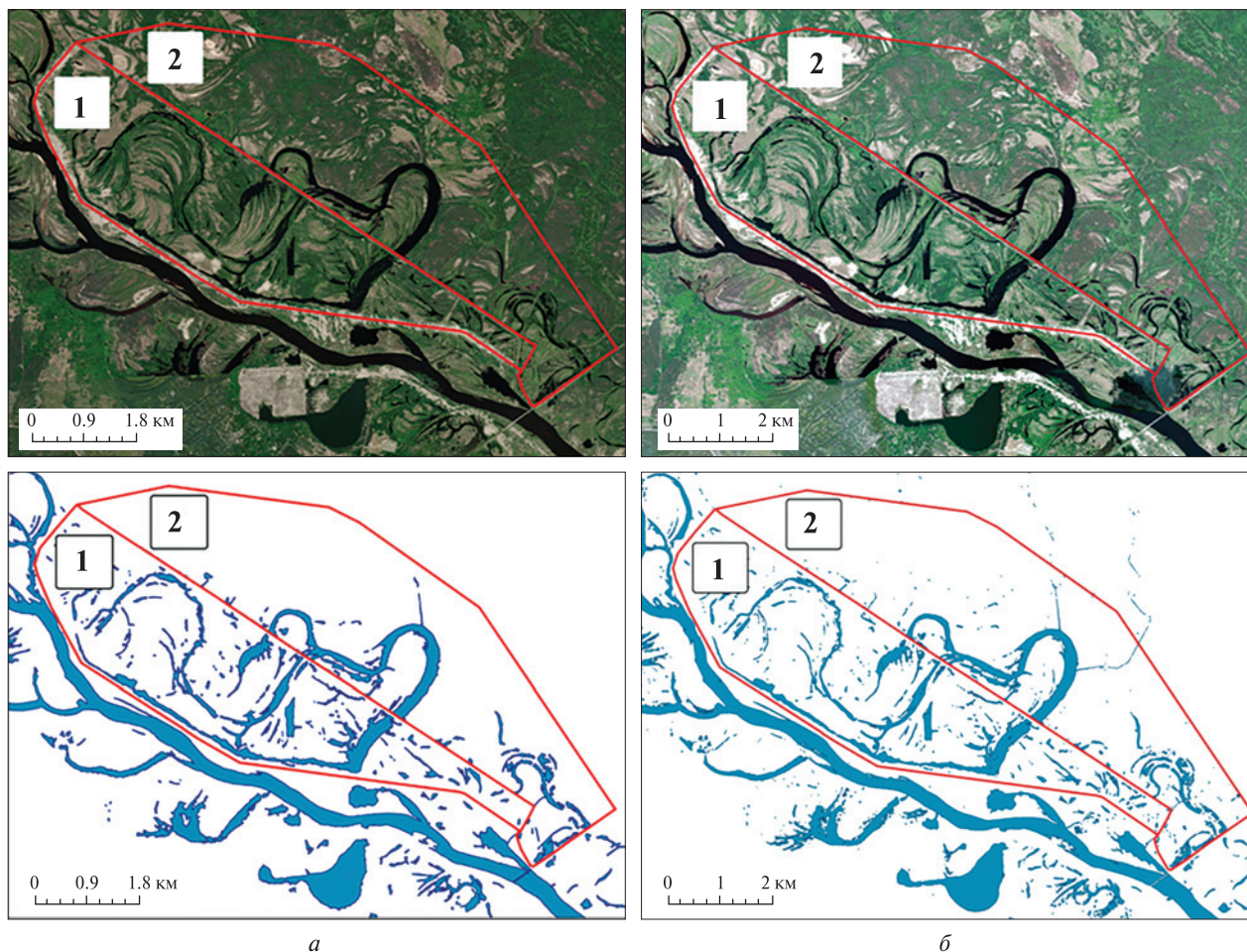


Рис. 8. Територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи. Космічні знімки, отримані з апарата «WorldView-2» (верхній ряд, синтез каналів 532 — 5-й, червоний (0.63...0.69 мкм), 3-й, зелений (0.51...0.58 мкм) і 2-й, блакитний (0.45...0.51 мкм)), та побудовані на основі їхнього застосування картосхеми водного дзеркала (нижній ряд) у межах міждамбової ділянки (1) та ділянки на північний схід від старої дамби (2): *а* — станом на 26.05.2018 р., *б* — станом на 06.04.2022 р.

нів ґрунтових вод (РГВ) та збільшення регуляторної ємності зони аерації (рис. 9). У зв'язку із значною інерційністю відновлення запасів ґрунтових вод навіть дещо вища за норму кількість атмосферних опадів холодного періоду 2021—2022 рр. (див. рис. 5) не призвела до збільшення площі водної поверхні навесні 2022 р., що вже була відчутно засушливою. У вересні — жовтні 2021 р. у межах лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять теж зафіксовано малу кількість атмосферних опадів, як сумарну, так і шару води, що випала: 114.59 м/67 мм відповід-

но. Про це виразно свідчать отримані нами статистичні дані (див. табл. 2, див. рис. 5, 6).

Отже, станом на 06 квітня 2022 р. за матеріалами космознімання площі відкритої водної поверхні на міждамбовій ділянці та на ділянці на північний схід від старої дамби були незначними і становили 1.93 км² та 1.37 км² відповідно (див. табл. 1, рис. 8, б).

За ознакою продовження рецесії РГВ у 2021—2022 рр. навіть після збільшення річної суми атмосферних опадів вище норми можна констатувати гідрологічну [39] та гідрогеологічну посухи

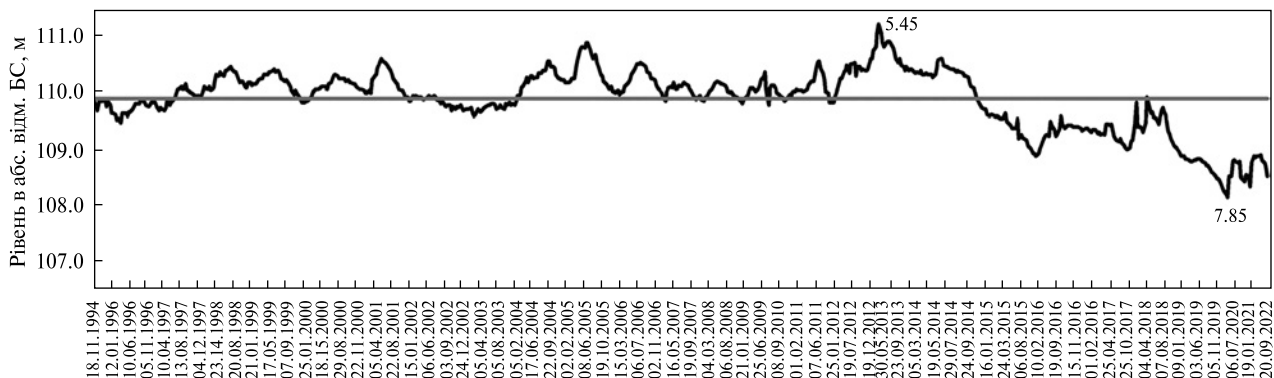


Рис. 9. Хронологічний графік коливань РГВ у свердловині 2-Г на водоносний горизонт у четвертинних відкладах на правобережній частині ЧЗВ, що охоплює період від 18.11.1994 р. до 20.09.2022 р. Максимальне значення РГВ від поверхні землі (5.45 м) зафіксовано 22.04.2013 р., мінімальне (7.85 м) — 02.03.2020 р.). Горизонтальна пряма — багаторічне середнє РГВ (109.85 м)

як прояв глобального потепління [20], а також достатньо високу гідрологічну вразливість водозбірної системи, що характерно для басейнів незарегульованих річок.

Разом з тим певне зростання встановленої методами ДЗЗ та ГІС площі водної поверхні на території досліджень у 2018 р., принаймні станом на 26 травня, могло бути зумовленим більш рясними опадами у вересні — жовтні та листопаді — грудні 2017 р., коли за даними платформи ERA5 у межах взятого до уваги водозбірного басейну р. Прип'ять їх нараховано 227.885 м/123 мм та 202.75 м/110 мм відповідно (див. табл. 2, та рис. 5). Необхідно відмітити, що внаслідок тривалого затоплення (1989—2000 рр.) початково добре проникних піщанистих ґрунтів відбулась кольматация їхнього порового простору мулом та злитизация, що значно уповільнило пропускання води з поверхні до РГВ, зменшило водовіддачу, проте збільшило водоутримувальну здатність ґрунту.

Загалом щороку, за винятком 2017 та 2022 рр., протягом чотирьох місяців з вересня по грудень включно на території лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять спостерігалася незначна сума атмосферних опадів: переважно менше 300 м (або в перерахунку 176 мм шару води, що випала).

Вочевидь, встановлене з використанням даних ДЗЗ відносне зневоднення території у 2015—

2020 рр. порівняно з періодом від кінця 1980-х років до 2010 р. зумовлене, на нашу думку, зменшенням кількості атмосферних опадів. Йдеться саме про визначальні для формування об'ємів поверхневих водойм сезони року, що особливо помітно після 2013 р. (див. рис. 5, 6). Переважно це спричинено перерозподілом опадів між тими місяцями, протягом яких у минулі роки їх випадало відносно менше. Усе це є проявами процесів глобальних змін клімату, що останнім часом дедалі більше інтенсифікуються. Під дією цих змін відбувається переважне потепління протягом більшості місяців року та розширення на північ, зокрема з захопленням Чорнобильського регіону, зони нестійкого зволоження, для якої притаманна значна втрата вологи на випаровування. Зростання температури холодного періоду призводить до частих відлиг, коли опади не замерзають або ж часто тануть і по земній поверхні стікають до дренажної мережі та/або активно інфільтруються в геологічне середовище, через те що ґрунт зони аерації недостатньо промерзає або ж розмерзається.

Процеси перерозподілу опадів та поверхневого стоку, що відбулись під дією змін клімату, відображаються також і на динаміці винесення ⁹⁰Sr, що добре простежується при аналізі графіків змін температури, опадів та водного винесення цього радіонукліду (див. рис. 6). Чітко помітно, що після 1990 р. (початок активної фази потепління

клімату в Україні) винесення ^{90}Sr , яке значною мірою визначається періодом весняної повені, обернено залежить від температури холодного періоду року (листопад — березень). За умов, коли протягом зими утримувалась переважно від’ємна температура, проявляється також прямий зв’язок між кількістю зимових опадів і винесенням радіонукліду ^{90}Sr . Очевидно, що підвищені температури та часті відлиги зимової пори не сприяють значному талому стоку і змиву радіонуклідів на початку весняної повені. Водночас аномально висока кількість опадів за холодний період 2012—2013 рр. (409 мм шару випалої води), збереженню якої до весняного танення сприяла достатньо витримана низька температура (середнє значення за холодний період $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$), забезпечила аномально високе винесення ^{90}Sr із території зони відчуження у 2013 р. (див. рис. 6, 7).

Через відсутність за останні 23 роки, за винятком 2013 р., інтенсивних весняних сніготанень з великої водозбірної території (басейну) у межах ЧЗВ не реєструються повені рівня 1999 р., поверхневі води на міждамбовій площі не накопичуються, перезволоження її з часом зменшується.

Здійснюючи порівняльний аналіз гідрологічної ситуації на території досліджень за даними космознімків різних років, потрібно звертати увагу на такий технічний параметр, як просторова розрізненість знімальної апаратури, якою їх одержано. Адже на перший погляд може здатися, що виявлені на КЗ «WorldView-2» площі відкритої водної поверхні станом на 26.05.2018 р. та 06.04.2022 р. більші за аналогічні, встановлені за знімками більш ранніх років з апаратів «Landsat» і SPOT [2, 17—19] (див. табл. 1). Це пояснюється тим, що просторова розрізненість зональних зображень супутника «WorldView-2», генералізованих до 6 м/пкл, дозволила виділити на міждамбовій ділянці детальних досліджень найвужчі протоки і найдрібніші водні об’єкти, що у багатьох випадках залежало від їхнього просторового розташування. Ці об’єкти через малі геометричні параметри не можна було виявити на знімках космічних апаратів «Landsat» та SPOT. Імовірно, що за цими КЗ середньої просторової розрізненості малорозмірні водні об’єкти спершу були

віднесені до перехідних (або змішаних) класів, які інтерпретувалися як площі із слабкозволоненими ґрунтовими утвореннями або ж площі з розвитком гідрофільної рослинності, і тому вважалися за «суходіл». Найімовірніше, значна частина з них у дійсності була мілководдям з наявністю макрофітів, яке також поросло вологолюбною рослинністю, характерною як для нього, так і для боліт, а тому насправді належала до класу об’єктів «вода».

Отже, співвідносячи просторові розрізненості зональних зображень, отриманих з супутника «WorldView-2» (генералізовано до 6 м/пкл), з аналогічними, наприклад з космічного апарата «Landsat» (30 м/пкл), можна умовно “нормалізувати” значення встановлених за знімками «WorldView-2» від 26.05.2018 р. та 06.04.2022 р. площ водного дзеркала до значень дешифрованих за знімками «Landsat-7 ETM+» (див. табл. 1). Для цього значення площі 5.414 км^2 потрібно поділити принаймні на 3 або навіть на 5. У цьому випадку площі відкритої водної поверхні у межах міждамбової ділянки Прип’ятської системи за знімками різних супутників можуть бути сумірними, принаймні однопорядковими. А це означає, що станом на травень 2018 р. і квітень 2022 р. ця ділянка не зазнавала значного затоплення порівняно з весняними періодами попередніх років (зокрема 2003 і 2004 рр.). Це може відображати відносну стабілізацію концентрації ^{90}Sr у поверхневому стоці досліджуваного району наприкінці другого — на початку третього десятиліття XXI століття.

Останній висновок підтверджується статистичними даними з оцінених ДСП «Екоцентр» протягом ряду років обсягів активності ^{90}Sr , що була винесена зі стоком з району лівобережного польдера (див. табл. 3 та рис. 7). Як видно, щорічно, вже починаючи з 2015 р. і протягом усіх років до 2021 р. включно, винесення ^{90}Sr з цієї території було на один-два порядки меншим, ніж у попередньому періоді 2009—2014 рр., коли на лівобережній Прип’ятській системі ПНС працювала у штатному режимі. Також ілюстративним є те, що у 2018 р., порівняно з трьома попередніми роками, показники незначного збільшення обсягів вносу ^{90}Sr зі стоком з досліджуваного

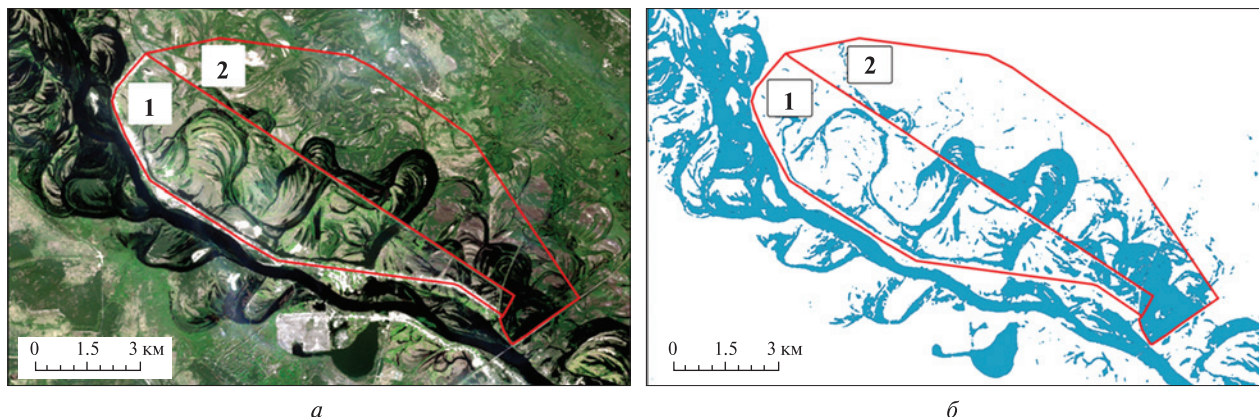


Рис. 10. Космічний знімок території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи (а) та створена на його основі картосхема водної поверхні (б) у межах водозбору між старою і новою дамбами (1) та на ділянці північно-східніше старої дамби (2). Знімок отримано з супутника «Sentinel-2» 02.05.2023 р. (синтез каналів 432 — 4-й, червоний (0.65...0.68 мкм), 3-й, зелений (0.543...0.577 мкм) і 2-й, блакитний (0.458...0.522 мкм))

району (0.07 ТБк) корелюють з невеликим зростанням (у порівнянні з 2003 і 2004 рр., див. табл. 1) площі відкритої водної поверхні, закартованої за даними ДЗЗ станом на 26.05.2018 р.

Таким чином, результати використання технологій ДЗЗ спільно з геоінформаційним аналізом апріорних матеріалів наземних спостережень і випробувань підтверджують доцільність прийнятого станом на квітень 2022 р. регламенту роботи ПНС та інших гідротехнічних об'єктів на лівобережній Прип'ятській осушувальній системі ЧЗВ, а також радіоекологічну ефективність їхнього функціонування загалом.

2023 р. На відміну від більшості попередніх років, КЗ за квітень — травень яких було проаналізовано, дані космічного знімання супутником «Sentinel-2» від 02.05.2023 р. засвідчують зростання обводнення території як міждамбової ділянки, так і району, розташованого північно-східніше старої дамби (див. табл. 1, рис. 10). Тобто, станом на вказану дату зйомки площа дзеркала води на міждамбовій ділянці становила 3.379 км². У порівнянні з результатами досліджень за матеріалами «WorldView-2» від 06.04.2022 р. площа відкритої водної поверхні збільшилася тут на 75 %, натомість площа суходолу зменшилася приблизно на 11 %.

Певне, хоча й не таке значне збільшення площі водної поверхні, також відмічається у меж-

ах ділянки на північний схід від старої дамби: 1.536 км² станом на 02.05.2023 р. порівняно з 1.37 км² станом на 06.04.2022 р. (12 %).

Вважаємо, що результати дистанційних досліджень водних об'єктів за даними КА «WorldView-2» і «Sentinel-2» є порівнянними. Адже просторову розрізненість знімків першого з них нами було генералізовано до 6 м/пкл, а вихідна розрізненість зональних зображень другого становить 10 м/пкл.

Кількість водних об'єктів та їхня площа у травні 2023 р. істотно збільшилася у південно-східній частині міждамбової ділянки і загалом безпосередньо поблизу обох дамб та в районі насипу залізничної колії Янів — Славутич. Візуально добре видно значне розширення водної поверхні усіх стариць, наприклад Краслянської, що на ділянці № 2 (рис. 10, б).

Виявлені з допомогою ДЗЗ/ГІС-технологій факти зростання обводнення території сигналізують про імовірне формування багатоводної фази водності у межах повного гідрологічного циклу, історично характерного для басейну р. Прип'ять. Такі цикли закінчуються маловодними фазами [14], одну з яких ми спостерігали протягом 2003—2022 рр. Причому тенденція у проходженні маловодної фази намічалася у 2021—2022 рр.

Натомість тенденція у формуванні багатоводної фази, ймовірно, підтверджується статистич-

ними даними про відносне збільшення у період вересень — грудень 2022 р. сумарної кількості атмосферних опадів у межах лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять (див. табл. 2 та рис. 5). Вони значно переважали відповідні показники 2021 р. та інших попередніх років. Так, сумарно кількість опадів у листопаді — грудні 2022 р. сягнула тут позначки 187.431 мм (або 110 мм шару води, що випала). Звичайно, охарактеризоване вище збільшення площі відкритих водних об'єктів у межах Прип'ятської лівобережної осушувальної системи станом на 02.05.2023 р. відносно збільшення сумарної кількості атмосферних опадів на прилеглий території водозбірного басейну восени й узимку 2022 р. пояснюється свого роду інерційною у часі реакцією у природній системі «атмосферні опади — поверхневі води». Адже вагому роль у співвідношенні показників у цій системі відіграють процеси масоперенесення (інфільтрації) поверхневої води у ґрунт, який є складовою частиною геосистеми «поверхневі відклади».

Іншою чіткою ознакою настання багатоводної фази водності були рясні дощі, що пройшли у квітні 2023 р. у досліджуваному регіоні, та затоплення, підтоплення значних площ, а також паводок на його території у квітні — травні цього ж року. У порівнянні з 2023 р. у квітні більшості попередніх років спостерігалися засухи та суховії, наслідком яких були численні пожежі у природних екосистемах, зокрема, у межах ЧЗВ [25]. Про розвиток багатоводної фази водності свідчить також початок у другій половині жовтня 2023 р. періоду практично перманентних дощів.

Розрахункові обсяги активності ^{90}Sr , які могли бути винесеними зі стоком з району лівобережного польдера у 2022 р. [8], цілком відповідають встановленим тенденціям їхнього зростання. Так, порівняно з 2021 р. у 2023 р. виніс зріс у чотири рази, а порівняно з 2020 р. — у 20 разів.

Таким чином, загальновідомі факти рясних весняних дощів, затоплень і підтоплень значних площ та паводкової ситуації на території досліджень у 2023 р., а також зафіксований починаючи з другої половини осені цього ж року період практично безперервних дощів загалом вказують на ймовірну, започатковану в кінці 2022 р.

тенденцію до зростання обсягів активності ^{90}Sr , що виноситиметься зі стоком з району лівобережного польдера до р. Прип'ять як у 2023 р., так і в наступних роках. Такий прогноз, на наш погляд, є обґрунтованим на основі поглибленого аналізу комплексу дистанційно і наземно отриманих даних із застосуванням сучасних інформаційних технологій.

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати застосування геоінформаційного аналізу комплексу дистанційних і наземних даних з метою оцінювання пов'язаних із кліматичними змінами трансформацій гідрологічних умов, що впливають на радіоекологічний стан у водно-болотних екосистемах на території ЧЗВ, у межах якої постійні моніторингові спостереження за водним стоком наразі об'єктивно не здійснюються, у вигляді відповідної науково-методичної рекомендації передано для використання в діяльності групи моніторингу приземного шару повітря та ландшафтів інформаційного науково-аналітичного відділу ДСП «Екоцентр» (Акт впровадження-приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок від 15.06.2023 р.). Вони використовувалися з метою оцінки обсягів вносу радіонуклідів з басейнів водного стоку у межах ЧЗВ до р. Прип'ять, а також з метою оцінки пожежної небезпеки та вжиття протипожежних заходів на відповідних територіях протягом 2023 р.

У перспективі результати досліджень можуть застосовуватися фахівцями підприємств ЧЗВ з метою удосконалення системи радіоекологічного моніторингу поверхневих вод на території Зони.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отже, результати досліджень засвідчили, що застосування технологій ДЗЗ та ГІС є оперативним і ефективним інструментом виявлення і стеження за гідрологічними процесами, оцінювання стану поверхневих водойм на територіях, які є важкодоступними, заболоченими, значною мірою забруднені радіоактивними випадіннями і у межах

яких безпосереднє перебування персоналу повинно бути вкрай обмеженим. У комплексі з матеріалами інтегрованих у ПС наземних вимірювань дистанційно отримані дані дають адекватну моніторингову інформацію про просторово-часові зміни радіаційно-екологічної ситуації загалом на таких територіях, зокрема у межах ЧЗВ.

У ході робіт здійснено ретроспективний та поточний з використанням матеріалів багатоспектрального космічного знімання аналіз гідрологічної ситуації на території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах української частини ЧЗВ. За результатами інтерпретації комплексу наземних вимірювань і супутникових даних встановлено значну чутливість системи «поверхневі води — суходіл» до змін довкілля території, виконано картування об'єктів відкритої водної поверхні, простежено її просторово-часову мінливість.

Доцільність і обґрунтованість рекомендації [18] стосовно найраціональнішого та найефективнішого варіанту експлуатації лівобережного водоохоронного комплексу — без використання ПНС, із природним фільтраційним розвантаженням стоку через тіло «нової» піщаної дамби у р. Прип'ять — підтверджено результатами тематичного дешифрування багатоспектральних космоснімків. Так, за даними ДЗЗ 2018 і 2022 рр. порівняно з періодом безперервної роботи ПНС у межах комплексу встановлено незначне обводнення та заболочення ділянки між старою та новою дамбами, а також ділянки північно-східніше старої дамби. Це може свідчити про трансформацію гідрологічних умов у межах території природно-техногенного комплексу Прип'ятської осушувальної системи, пов'язаних з процесами глобальних змін клімату (переважно глобального потепління з тенденцією до перерозподілу кількості атмосферних опадів між місяцями протягом року, що призводить до їхнього зменшення у весняний період).

Разом з цим аналітичні дані супутникових знімань та матеріали гідрометеорологічних спостережень 2023 р. дають можливість прогнозувати цілком вірогідне настання багатоводної фази водності в рамках повного гідрологічного циклу. Про це свідчать отримані на їхній основі резуль-

тати, згідно з якими у межах ЧЗВ встановлено зростання обводнення території лівобережної Прип'ятської системи. Тому прогнозується, що така ситуація у перспективі може призвести до зростання обсягів активності ^{90}Sr зі стоком з району лівобережного польдера як у 2023 р., так і в наступні 2-3 роки.

Отримані у процесі досліджень результати використовувалися фахівцями підприємств ЧЗВ відповідного профілю з метою удосконалення системи радіоекологічного моніторингу поверхневих вод у Зоні, для оцінювання обсягів виносу радіонуклідів з басейнів водного стоку в її межах до р. Прип'ять, а також з метою аналізу природної пожежонебезпеки, прийняття управлінських рішень та вжиття протипожежних заходів на відповідних територіях.

Перспективи подальших досліджень різноманітних гідрологічних процесів та радіоекологічної обстановки на лівобережжі р. Прип'ять з метою значного зменшення або уникнення опромінення персоналу при проведенні польових робіт, на нашу думку, полягають у використанні даних космозйомки високої просторової, спектральної й радіометричної розрізненності, що виконувалася б з порівняно невеликим часовим інтервалом (у період повеней — щотижня, в інший час — один раз на 1-3 місяці). Застосування технологій безпілотних літальних апаратів у ході досліджень (гіперспектральне знімання по достатній кількості профілів і точок спостережень, або ж площове знімання з просторовою розрізненністю близько 2 см/пкл) та активне використання отриманих матеріалів спільно з наземними і супутниковими даними надасть якісно новий поштовх у вивченні радіогідрологічного й радіоекологічного стану території ЧЗВ. Отримані таким чином гетерогенні дані у перспективі є сенс інтегрально обробити, залучаючи відповідне програмне забезпечення.

Інформативність вказаного комплексу робіт порівняно з традиційними методами значно зросте, що допомагатиме точніше визначати водний баланс замкнених водойм, дозволить чіткіше встановлювати зміни у гідрографії й скоригувувати контури площ водозбірних басейнів, знання про які дадуть можливість достовірніше

встановлювати такі поточні показники радіологічного моніторингу, як модулі стоку і модулі винесення радіонуклідів, а також дасть можливість вирішувати ряд інших тематичних завдань.

Роль дистанційних методів моніторингу природно-територіальних комплексів, уражених техногенними катастрофами, стає надзвичайно важливою в умовах тимчасового припинення роботи різноманітних систем контролю компонентів довкілля, як це відбулося з автоматизованою системою контролю та з комплексом наземних

спостережень за радіаційним станом у ЧЗВ навесні 2022 р. під час її окупації регулярними військами російської федерації. У зв'язку з діючим у теперішній час воєнним станом в Україні та неможливістю доступу до природно-техногенних об'єктів на території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи з метою оцінки їхнього впливу на навколишнє середовище ЧЗВ загалом застосування відповідних моніторингових досліджень на підставі ДЗЗ/ГІС-технологій є надзвичайно актуальним і перспективним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Азімов О., Кураєва І., Трофимчук О., Злобіна К., Кармазиненко С. Моніторингова оцінка якості поверхневих вод у районах захоронення твердих побутових відходів. *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Геологія*. 2020. Вип. 4 (91). С. 56—60. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08>
2. Азімов О. Т., Шевченко О. Л. Впровадження сучасних інформаційних систем як засіб підвищення ефективності водоохоронних заходів на радіоактивно забруднених площах Зони відчуження ЧАЕС. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2005. № 1. С. 37—40.
3. Азімов О. Т., Шевченко О. Л., Томченко О. В. Геоінформаційний аналіз даних космічних знімків з метою оцінювання змін радіогідрологічних умов територій. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2022. 9, № 2. С. 13—36. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.2.21>
4. Байрак Г. Р., Муха Б. П. *Дистанційні дослідження Землі: навч. посіб.* Львів: Видав. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2010. 712 с. ISBN 978-966-613-761-9
5. Вишняков В. Ю., Охарев В. О., Радчук І. В., Шумейко В. О. Реалізація геоінформаційних технологій підтримки прийняття рішень для управління водокористуванням та екологічною безпекою озерних екосистем. *Уч. записки Таврического нац. ун-та ім. В. И. Вернадского. Географія*. 2013. 26 (65), № 1. С. 49—54.
6. Деревець В. В., Кіреєв С. І., Обрізан С. М., Годун Б. О., Халява В. Г., Купченко П. Г., Бицуля В. В., Горський Б. О., Назаров О. Б., Паланський В. А. Радіаційний стан зони відчуження в 2001 році. *Бюл. екологічного стану зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення*. 2002. № 1 (19). С. 3—31.
7. Довгий С. О., Лялько В. І., Трофимчук О. М., Федоровський О. Д., Азімов О. Т., Верюжський Г. Ю., Вульфсон Л. Д., Греков Л. Д., Кононов В. І., Копійка О. В., Костюченко Ю. В., Крот В. М., Ловцов І. В., Перерва В. М., Прусов В. А., Рябоконеко О. Д., Савицький О. А., Сахацький О. І., Терьоменко О. М., Ходоровський А. Я., Яценко О. В. *Інформатизація аерокосмічного землезнавства*; За ред. С. О. Довгого, В. І. Лялька. Київ: Наук. думка, 2001. 607 с. ISBN 966-00-0743-4.
8. Інформаційний звіт про результати радіаційно-екологічного моніторингу зони відчуження за 2022 рік. *Чорнобиль: ДСП «Екоцентр»*, 2022. 35 с.
9. Кондратьєв К. Я., Поздняков Д. В. *Дистанционные методы слежения за качеством природных вод*. Ленинград: Наука, 1985. 62 с.
10. Красовський Г. Я., Волошкіна О. С., Пономаренко І. Г., Слободян В. А. Інвентаризація водойм регіону з застосуванням космічних знімків і геоінформаційних систем. *Екологія і ресурси*. 2005. № 11. С. 19—42.
11. Красовський Г. Я., Петросов В. А. *Інформаційні технології космічного моніторингу водних екосистем і прогнозу водоспоживання міст*. Київ: Наук. думка, 2003. 224 с.
12. Кронберг П. *Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии*. Пер. с нем. Москва: Мир, 1988. 343 с. ISBN 5-03-000545-5
13. Лялько В. І., Федоровський О. Д., Боєв А. Г., Драновський В. Й., Книш В. В., Коротаєв Г. К., Сіренко Л. А., Азімов О. Т., Бушуєв Є. І., Вульфсон Л. Д., Єфімов В. Б., Колодяжний О. А., Костюченко Ю. В., Курекін О. О., Малиновський В. В., Машковський О. Г., Мичак А. Г., Мойсеєнко К. Я., Перерва В. М., Пустовойтенко В. В., Радайка Л. М., Сахацький О. І., Суслін В. В., Ходоровський А. Я., Цимбал В. М., Якимчук В. Г., Волошин В. І., Гунченко В. О., Колоколов О. О., Котляр О. Л., Ліщенко Л. П., Рябоконеко О. Д., Теременко О. М., Харечко О. Г., Шепець М. С. *Космос — Україні: Атлас тематично дешифрованих знімків території України з українсько-російського*

- космічного апарата «Океан-О» та інших космічних апаратів. Під ред. В. І. Лялька, О. Д. Федоровського. Київ: НАН України, НКА України, 2001. 106 с.
14. Ободовський Ю. О., Хільчевський В. К., Ободовський О. Г. *Гідроморфоєкологічна оцінка руслових процесів річок верхньої частини басейну Тиси (в межах України): монографія*. За ред. О. Г. Ободовського. Київ: Прінт-сервіс, 2018. 193 с. ISBN 978-617-7069-71-4
 15. Підгородецька Л. В., Зуб Л. М., Федоровський О. Д. Використання інформації космічного геомоніторингу для оцінки екологічного стану водойм на прикладі озера Світязь. *Космічна наука і технологія*. 2010. **16**, № 4. С. 51—56. <https://doi.org/10.15407/knit2010.04.051>
 16. Федоровський О. Д., Сіренко Л. Я., Якимчук В. Г. Використання космічних знімків для контролю водних об'єктів. *Нові методи в аерокосмічному землезнавстві: наук.-метод. посіб.* Відп. ред. В. І. Лялька. Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 1999. С. 143—148. ISBN 966-02-1398-0
 17. Шевченко О. Л., Азімов О. Т., Сахацький О. І. Сучасні дистанційні аерокосмічні технології в комплексі радіогідрологічного моніторингу. *Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Геологія*. 2004. Вип. 29. С. 40—44.
 18. Шевченко О. Л., Козицький О. М., Наседкін І. Ю., Акінф'єв Г. О., Кіреєв С. І., Сахацький О. І., Ходоровський А. Я. Аналіз ефективності та варіанти експлуатації водоохоронного комплексу Лівобережної польдерної системи. *Пробл. Чорнобильської зони відчуження*. 2001. Вип. 7. С. 112—125.
 19. Шевченко О. Л., Наседкін І. Ю., Козицький О. М., Шабатура С. С., Ходоровський А. Я., Сахацький О. І., Азімов О. Т., Акінф'єв Г. О., Долін В. В., Осадчий В. І., Левченко А. С., Тишкевич Ю. О., Чарний Д. В., Онанко Г. Г., Гудзенко В. В. Розрахунок водно-радіаційного балансу осушувальних систем лівобережної заплави р. Прип'ять в 30-км зоні ЧАЕС. Київ: НІЦ РПД НАН України, 1998. 1. 213 с.
 20. Шевченко О. Л., Скорбун А. Д., Чарний Д. В. Підпорядкованість коливань рівнів ґрунтових вод в басейні р. Південний Буг кліматичним змінам. *Вісник Одес. нац. ун-ту. Географічні та геологічні науки*. 2021. **26**, вип. 2 (39). С. 175—194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202)
 21. Шевченко О. Л., Шестопалов В. М., Сахацький О. І., Наседкін І. Ю., Гудзенко В. В., Акінф'єв Г. О. Лівобережна заплава: шляхи вирішення проблеми перезволоження та зростання вносу ⁹⁰Sr через проран в дамбі № 7. *Бюл. екологічного стану Зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення*. 1999. № 14. С. 51—57.
 22. Шумаков Ф. Т., Азімов А. Т. Об использовании геоинформационных технологий и данных космических изображений для оценки качества воды в водоемах. Матеріали XII Міжнар. конф. «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти» (Київ, 13—15 травня 2013 р.). EAGE, *EarthDoc*, 2013. id: cp-347-00049. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142427>
 23. *Advances in geoscience and remote sensing*; Jedlovac G. (Ed.). Vukovar, Croatia: In-Teh, 2009. 741 p.
 24. Azimov O. T., Dorofey Ye. M., Trofymchuk O. M., Kuraeva I. V., Zlobina K. S., Karmazyenko S. P. Monitoring and assessment of impact of municipal solid waste landfills on the surface water quality in the adjacent ponds. 13th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (12—15 November 2019, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*. **2019**. P. 1—6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903228>
 25. Azimov O. T., Kireev S. I., Tomchenko O. V., Veremenko D. M. Monitoring of the radioecological state of the atmospheric air using the ground survey and multispectral satellite imaging data during wildfires. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15—18 November 2022, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*. **2022**. P. 1—5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580105>
 26. Azimov O. T., Tomchenko O. V., Andreiev A. A., Dorofey Ye. M., Shevchenko O. L., Kireev S. I. Monitoring of the current underflooding processes of drainage systems in the Exclusion Zone by means of remote sensing and GIS-technologies. 17th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (7—10 November 2023, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*. **2023**. P. 1—5.
 27. Azimov O., Tomchenko O., Shevchenko O., Dorofey Ye. Satellite monitoring of the natural and technogenic events on the left-bank Pripyat reclamation system of the Chernobyl Exclusion Zone. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*. **2022**. P. 1—6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580102>
 28. Campbell J. B., Wynne R. H. *Introduction to remote sensing*; 5th ed. New York, London: The Guilford Press, 2011. 718 p. ISBN 978-1-60918-176-5
 29. Doerffer R. Zum Problem der Fernerkundung von Substanzen im Wasser mit dem Multispektralabtaster. *Bildmessung und Luftbildwesen*. 1978. **4**. P. 133—138.
 30. Doerffer R. Untersuchungen über die Verteilung oberflächennaher Substanzen im Elbe-Ästuar mit Hilfe von Fernmeßverfahren. *Archiv für Hydrobiologie, Suppl.* 1979. **43** (Elbe-Ästuar 4) (2/3). P. 119—224.
 31. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

32. Fekrache F., Boudeffa K. Application of mapping and statistical study for the assessment of surface water quality in the Safsaf River (North-Eastern Algeria). *Res. Square*. 2023 (October 16th). P. 1—17. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3440178/v1>
33. Heiskary S. A., Wilson C. B. *Minnesota lake water quality assessment report: Developing nutrient criteria* (third ed.). Minnesota Pollution Control Agency, September 2005. 188 p.
34. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sensing*. 1996. **17** (7). P. 1425—1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
35. Olmanson L. G., Bauer M. E., Brezonik P. L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*. 2008. **112** (11). P. 4086—4097.
36. Rowland E. D., Okpobiri O. Floodplain Mapping and Risks Assessment of the Orashi River Using Remote Sensing and GIS in the Niger Delta Region, Nigeria. *J. Geographical Res.* 2021. **4** (2). P. 10—16. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i2.3014>
37. Rubin H. J., Lutz D. A., Steele B. G., Cottingham K. L., Weathers K. C. Ducey M. J., Palace M., Johnson K. M., Chipman J. W. Remote sensing of lake water clarity: Performance and transferability of both historical algorithms and machine learning. *Remote Sensing*. 2021. **13** (8). 1434. <https://doi.org/10.3390/rs13081434>
38. Santos G. M. D., Navarro-Pedreño J., Meléndez-Pastor I., Gómez Lucas I. (2021). Using Landsat Images to Determine Water Storing Capacity in Mediterranean Environments. *J. Geographical Res.* **4** (4). P. 58—67. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i4.3780>
39. Van Loon A. F. Hydrological drought explained. *WIREs Water*. 2015. **2** (4). P. 359—392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>

REFERENCES

1. Azimov O., Kuraeva I., Trofymchuk O., Zlobina K., Karmazynenko S. (2020). Monitoring assessment of the surface water quality within the areas for the municipal solid waste disposal. *Visnyk of Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv: Geology*, **4** (91), 56—60. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08> [in Ukrainian with English abstract].
2. Azimov O. T., Shevchenko O. L. (2005). Instillation the modern information systems as a means for increasing the effectiveness of water protection measures within radioactivity contaminated areas of the Chornobyl Exclusion Zone. *Ecology of the Environment and Safety of Human Livelihood*, **1**, 37—40 [in Ukrainian with English summary].
3. Azimov O. T., Shevchenko O. L., Tomchenko O. V. (2022). Geoinformation analysis of the satellite imagery data in order to assess the changes in radiohydrological conditions over the study territories. *Ukr. J. Remote Sensing*, **9** (2), 13—36. <https://doi.org/10.36023/ujsr.2022.9.2.213> [in Ukrainian with English abstract].
4. Bairak G. R., Mukha B. P. (2010). *Remote sensing of the Earth: Training manual*. Lviv: Ivan Franko Nat. Univ. Publ. center, 712 p. ISBN 978-966-613-761-9 [in Ukrainian].
5. Vyshnyakov V. Y., Okhariev V. O., Radchuk I. V., Shumeiko V. O. (2013). GIS-technologies for decision making in context of water resource management and ecological safety of limnological ecosystems. *Sci. Notes of Taurida V. Vernadsky Nat. Univ.: Geography*, **26** (65), **1**, 49—54 [in Ukrainian with English summary].
6. Derevets V. V., Kireev S. I., Obrizan S. M., Hodun B. O., Khaliava V. H., Kupchenko P. H., Bytsulia V. V., Horskyi B. O., Nazarov O. B., Palanskyi V. A. (2002). The radiation status of the Exclusion Zone in 2001. *Bull. Ecological State Exclusion Zone and Zone Absolute (Mandatory) Resettlement*, **1** (19), 3—31 [in Ukrainian].
7. Dovhyi S. O., Lyalko V. I., Trofymchuk O. M., Fedorovsky O. D., Azimov O. T., Veriuzhskiy G. Yu., Vulfson L. D., Grekov L. D., Kononov V. I., Kopyika O. V., Kostyuchenko Yu. V., Krot V. M., Lovtsov I. V., Pererva V. M., Prusov V. A., Riabokononko O. D., Savytskyi O. A., Sakhatsky O. I., Teremenko O. M., Khodorovsky A. Ya., Yatsenko O. V. (2001). *Informationisation of aerospace Earth science*. Eds. S. O. Dovhyi, V. I. Lyalko. Kyiv: Naukova Dumka, 607 p. ISBN 966-00-0743-4 [in Ukrainian].
8. Information Report on the results of radiation and environmental monitoring of the Exclusion Zone for 2022. (2022). Chornobyl: SSE Ecocentre, 35 p. [in Ukrainian].
9. Kondratiev K. Ya., Pozdniakov D. V. (1985). *Remote methods of controlling after quality of natural waters*. Leningrad: Nauka, 62 p. [in Russian].
10. Krasovsky G. Y., Voloshkina O. S., Ponomarenko I. G., Slobodian V. A. (2005). Inventory of water bodies in the region using the satellite images and geoinformation systems. *Ecology and Resources*, **11**, 19—42 [in Ukrainian with English abstract].
11. Krasovsky G. Y., Petrosov V. A. (2003). *Information technologies of the satellite monitoring of aquatic ecosystems and predicting urban water consumption*. Kyiv: Naukova Dumka, 224 p. [in Ukrainian].
12. Kronberg P. (1985). *Fernerkundung der Erde: Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 394 p. ISBN 3-432-94601-5
13. Lyalko V. I., Fedorovsky O. D., Boyev A. G., Dranovsky V. Y., Knysh V. V., Korotaev G. K., Sirenko L. A., Azimov O. T., Bushuev Ye. I., Vulfson L. D., Yefimov V. B., Kolodyazhnyy O. A., Kostyuchenko Yu. V., Kurekin A. S., Malynovsky V. V., Mashkovsky O. G., Mychak A. G., Moysyenko K. Ya., Pererva V. M., Pustovoytenko V. V., Radaykina L. M., Sakhats-

- ky O. I., Suslin V. V., Khodorovsky A. Ya., Tsymbal V. N., Yakymchuk V. G., Voloshyn V. I., Gunchenko V. O., Kolokolov O. O., Kotlyar O. L., Lischenko L. P., Riabokononko O. D., Teremenko O. M., Kharechko O. G., Shchepets M. S. (2001). *Space for Ukraine: Atlas. Thematically interpreted images of Ukraine's territory acquired in the frame of Ukrainian-Russian "Okean-O" program and other space missions*. Eds. V. I. Lyalko, O. D. Fedorovsky. Kyiv: NAS of Ukraine, Nat. Space Agency of Ukraine, 99 p.
14. Obodovskiy Y. O., Khilchevskiy V. K., Obodovskiy O. G. (2018). *Hydromorphoecological assessment of the river bed processes of rivers in the upper Tisza river basin (within Ukraine): Monograph*. Ed. O. G. Obodovskiy. Kyiv: Print-Service, 193 p. ISBN 978-617-7069-71-4 [in Ukrainian with English abstract].
 15. Podgorodetskaia L. V., Zub L. N., Fedorovskii O. D. (2010). The use of remote sensing data for estimation of ecological state of water bodies by the example of the Svityaz Lake. *Space Science and Technology*, **16** (4), 51–56. <https://doi.org/10.15407/knit2010.04.051> [in Ukrainian with English abstract].
 16. Fedorovsky O. D., Sirenko L. Ya., Yakymchuk V. G. (1999). Using space images for controlling of water objects. *New methods in the aerospace Earth exploration: Sci. and learning guide*. Ed. V. I. Lyalko. Kyiv: CASRE IGS NAS of Ukraine, 143–148. ISBN 966-02-1398-0 [in Ukrainian].
 17. Shevchenko O., Azimov O., Sakhatsky O. (2004). Modern remote aerospace technologies for integral radiohydrological monitoring. *Visnyk of Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv: Geology*, **29**, 40–44 [in Ukrainian with English summary].
 18. Shevchenko A. L., Kozitsky O. M., Nasedkin I. Yu., Akinfiev G. A., Kireev S. I., Sakhatsky A. I., Khodorovsky A. Y. (2001). Performance analysis and the variants of water-protecting complex at Left-bank polder system. *Probl. Chernobyl Exclusion Zone*, **7**, 112–125 [in Ukrainian with English abstract].
 19. Shevchenko O. L., Nasedkin I. Yu., Kozitsky O. M., Shabatura S. S., Khodorovsky A. Ya., Sakhatsky O. I., Azimov O. T., Akinfiev G. O., Dolin V. V., Osadchyi V. I., Levchenko A. S., Tyshkevych Yu. O., Charnyi D. V., Onanko G. G., Gudzenko V. V. (1998). Calculation of the water-radiation balance of reclamative systems of the Left-bank flood plain of the Pripyat river in 30-km Zone of the ChNPP: Report on research. Kyiv: Radioecological Center, NAS of Ukraine. **1**, 213 p. [in Ukrainian].
 20. Shevchenko O. L., Skorbut A. D., Charny D. V. (2021). Subordination of fluctuations of groundwater levels in the Southern Bug River basin to climate change. *Odesa Nat. Univ. Herald: Geography & Geology*, **26**, 2 (39), 175–194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202) [in Ukrainian with English abstract].
 21. Shevchenko O. L., Shestopalov V. M., Sakhatsky O. I., Nasedkin I. Yu., Gudzenko V. V., Akinfiev G. O. (1999). Left-bank floodplain: ways to solve the problem of overwetting and increase ⁹⁰Sr removal through the duct in the dam No 7. *Bull. Ecological State Exclusion Zone and Zone Absolute (Mandatory) Resettlement*, **14**, 51–57. [in Ukrainian].
 22. Shumakov F. T., Azimov O. T. (2013). On the use of GIS and satellite imagery data to assess the quality of water in reservoirs. *12th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects (13-16 May 2013, Kiev, Ukraine)*. *Conf. Papers*, id: cp-347-00049. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142427> [in Russian with English summary].
 23. *Advances in geoscience and remote sensing*. Ed. G. Jedlovec. (2009). Vukovar, Croatia: In-Teh, 741 p.
 24. Azimov O. T., Dorofey Ye. M., Trofymchuk O. M., Kuraeva I. V., Zlobina K. S., Karmazylenko S. P. (2019). Monitoring and assessment of impact of municipal solid waste landfills on the surface water quality in the adjacent ponds. 13th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (12–15 November 2019, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*, **2019**, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903228>
 25. Azimov O. T., Kireev S. I., Tomchenko O. V., Veremenko D. M. (2022). Monitoring of the radioecological state of the atmospheric air using the ground survey and multispectral satellite imaging data during wildfires. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15–18 November 2022, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*, **2022**, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580105>
 26. Azimov O. T., Tomchenko O. V., Andreiev A. A., Dorofey Ye. M., Shevchenko O. L., Kireev S. I. (2023). Monitoring of the current underflooding processes of drainage systems in the Exclusion Zone by means of remote sensing and GIS-technologies. 17th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (7–10 November 2023, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*, **2023**, 1–5.
 27. Azimov O., Tomchenko O., Shevchenko O., Dorofey Ye. (2022). Satellite monitoring of the natural and technogenic events on the left-bank Pripyat reclamation system of the Chornobyl Exclusion Zone. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*, **2022**, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580102>
 28. Campbell J. B., Wynne R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). New York, London: Guilford Press, 718 p. ISBN 978-1-60918-176-5
 29. Doerffer R. (1978). Zum Problem der Fernerkundung von Substanzen im Wasser mit dem Multispektralabtaster. *Bildmessung und Luftbildwesen*, **4**, 133–138.

30. Doerffer R. (1979). Untersuchungen über die Verteilung oberflächennaher Substanzen im Elbe-Ästuar mit Hilfe von Fernmeßverfahren. *Archiv für Hydrobiologie, Supplement*, 43 (Elbe-Ästuar 4) (2/3), 119—224.
31. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
32. Fekrache F., Boudeffa K. (October 16th, 2023). Application of mapping and statistical study for the assessment of surface water quality in the Safsaf River (North-Eastern Algeria). *Res. Square*, 1—17. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3440178/v1>
33. Heiskary S. A., Wilson C. B. (2005). *Minnesota lake water quality assessment report: Developing nutrient criteria* (third ed.). Minnesota Pollution Control Agency, 188 p.
34. McFeeters S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sensing*, 17 (7), 1425—1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
35. Olmanson L. G., Bauer M. E., Brezonik P. L. (2008). A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*, 112 (11), 4086—4097.
36. Rowland E. D., Okpobiri O. (2021). Floodplain Mapping and Risks Assessment of the Orashi River Using Remote Sensing and GIS in the Niger Delta Region, Nigeria. *J. Geographical Res.*, 4 (2), 10—16. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i2.3014>
37. Rubin H. J., Lutz D. A., Steele B. G., Cottingham K. L., Weathers K. C. Ducey M. J., Palace M., Johnson K. M., Chipman J. W. (2021). Remote sensing of lake water clarity: Performance and transferability of both historical algorithms and machine learning. *Remote Sensing*, 13 (8), 1434. <https://doi.org/10.3390/rs13081434>
38. Santos G. M. D., Navarro-Pedreño J., Meléndez-Pastor I., Gómez Lucas I. (2021). Using Landsat Images to Determine Water Storing Capacity in Mediterranean Environments. *J. Geographical Res.*, 4 (4), 58—67. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i4.3780>
39. Van Loon A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2 (4), 359—392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>

Стаття надійшла до редакції 16.10.2023

Після доопрацювання 17.01.2024

Прийнято до друку 30.01.2024

Received 16.10.2023

Revised 17.01.2024

Accepted 30.01.2024

O. T. Azimov¹, Head Researcher, Dr. Sci. in Geol., Senior Scientist

ORCID 0000-0002-5210-3920

E-mail: azimov@casre.kiev.ua

O. V. Tomchenko¹, Senior Researcher, Cand. Sci. in Engineer

ORCID 0000-0001-6975-9099

E-mail: tomch@i.ua

O. L. Shevchenko², Head Researcher, Dr. Sci. in Geol., Senior Scientist

ORCID 0000-0002-5791-5354

E-mail: shevch62@gmail.com

S. I. Kireev³, General Director

ORCID 0000-0001-7059-3655

E-mail: kireev@ecocentre.kiev.ua

¹ Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine
55-B O. Honchar Str., Kyiv, 01054 Ukraine

² Ukrainian Research Hydrometeorological Institute under the Ministry for Emergencies and the National Academy of Sciences of Ukraine
37 Nauky ave., Kyiv, 03028 Ukraine

³ State Specialized Enterprise «Ecocentre»
6 Shkilna Str., Chornobyl, Kyivska oblast, 07270 Ukraine

WATER RESOURCE MONITORING FOR THE DRAINAGE SYSTEMS CONTAMINATED BY RADIATION BASED ON THE COMPLEX OF SATELLITE IMAGING AND GROUND OBSERVATIONS (IN THE CONTEXT OF REGIONAL CLIMATE CHANGES)

As a case study of the Prypiat Left Bank Drainage System of the Chornobyl Exclusion Zone, the probable onset of the multi-aqueous phase of water content in the frame of the entire hydrological cycle at the end of 2022 was estimated for the entire region of Polissia. The attributes of such a process are 1) a relative increase in the total amount of atmospheric precipitation

for the period of September–October–November–December in 2022 compared to the same period in previous years within the entire left-bank part of the Prypiat River catchment basin (according to the ERA5 dataset); 2) the increase in the watering rate of the drainage system territory — both the interdam section and the area located to the northeast of the old dam (this is evidenced by an analytical comparison of the results of the thematic interpretation of «Sentinel-2» image data for 02.05.2023 and satellite data acquired by the various sensors for April — May of previous years); 3) the established facts of heavy rains that occurred in April 2023 in the studied region, flooding, submergence of the large areas, freshet in its territory in April — May of the same year.

As a result, compared to the period 2015—2021, i.e., already after the termination of the permanent operation of the polder pumping station in the area of the left bank polder, in 2022, the level of ^{90}Sr activity which, according to calculations, could have been removed with the runoff from this territory, increased significantly — 4 times more as compared to 2021 and 20 times more compared to 2020. Therefore, considering the above hydrometeorological factors, the prediction regarding the increase in the level of ^{90}Sr activity, which will be carried out with the runoff from the area of the left-bank polder to the Prypiat River, both in 2023 and the following 2–3 years is substantiated.

Keywords: Chernobyl Exclusion Zone, Left Bank Drainage System, water resources, monitoring, remote sensing methods, surface runoff, radionuclide carry-over.

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.093>
UDC 551.510.42

I. I. SYNIAVSKIY¹, Head of Department, Candidate of Technical Sciences, Senior researcher

A. J. CASTRO-TIRADO², Profesores de Investigación, Ph.D. in Physics

Yu. S. IVANOV¹, Senior researcher

S. S. GUZIY^{2,3}, Doctor Contratado², Associate Professor³, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Ye. A. OBEREMOK^{1,4}, Researcher¹, Associate Professor⁴, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

¹ Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine

27, Akademika Zabolotnoho Str., Kyiv, 03143 Ukraine

² Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)

Glorieta de la Astronomía s/n, 18008 Granada, Spain

³ Petro Mohyla Black Sea National University

10, 68 Desantnykiv Str., Mykolajiv, 54000 Ukraine

⁴ Taras Shevchenko National University of Kyiv

60, Volodymyrska Str., Kyiv, 01033 Ukraine

A WIDE-ANGLE STOKES POLARIMETER FOR THE BOOTES GLOBAL TELESCOPE NETWORK. OPTICAL AND MECHANICAL DESIGN

We describe the imaging polarimeter EDIPO (Efficient & Dedicated wide-field Imaging Polarimeter) as a part of astronomical telescopes of the BOOTES (Burst Observer and Optical Transient Exploring System) network that is intended for the study of polarization features of the rapid processes of the gamma-ray bursts afterglow (Gamma-ray burst — GRB). The design of the polarimeter allows one to be installed on the network telescopes with a diameter of the main mirror up to 1.4 m. The EDIPO is designed to analyze the polarization parameters of linearly polarized light in the spectral range of 450–1000 nm. The polarization analyzer of the polarimeter does not contain moving elements and allows measurements of Stokes parameters I , Q , U of light in a $30' \times 30'$ field of view simultaneously for one spectral band of the working spectral range. The optical part of the polarimeter was assembled and tested on a telescope with a mirror diameter of 1.2 m. The calibration approaches for the polarimeter-telescope system are considered.

Keywords: polarization, Stokes-polarimeter, astronomical observations.

1. INTRODUCTION

Today, the study of celestial bodies is increasingly carried out by analyzing the polarization of their own or scattered radiation. Such studies provide insight into various astrophysical events: objects of the Solar System, stellar physics, our Galaxy and the interstellar medium, extragalactic astronomy, and cosmology. In the physics of the Solar System, polarimetric

observations of solar radiation scattered by asteroids allow determining their albedo and size distributions [13, 49, 60]. Measuring the polarization of light scattered by comets helps in their classification [18–20, 23]. In the context of studying the structure of our galaxy, it is expected that polarimetric measurements will allow us to map the distribution of its magnetic field lines through giant molecular clouds, provid-

Цитування: Syniavskiy I. I., Castro-Tirado A. J., Ivanov Yu. S., Guziy S. S., Oberemok Ye. A. A wide-angle Stokes polarimeter for the BOOTES global telescope network. Optical and mechanical design. *Space Science and Technology*. 2024. **30**, № 2 (147). P. 93–108. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.093>

© Publisher PH «Akadempriodyka» of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

ing an understanding of the connection of the field with the diffuse interstellar medium, which includes clouds, spheres, open clusters, etc. [12, 24, 31, 52]. In extragalactic astronomy, the sources of high-energy gamma radiation are of interest [15, 55], which are studied, for example, at the Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) using the Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope (EGRET) [46]. During these studies, many blazars were discovered [2], which have an impact on the identification of most gamma-ray sources, but that still remain unknown due to large errors [48]. Gamma radiation polarization analysis will also reduce these errors. The analysis of the polarization of scattered radiation would allow us to determine some large-scale structures of the magnetic field, such as the structures of the Magellanic clouds and their relations with gas dynamics [27]. In cosmology, sampling the polarization of starlight across the sky will allow a better simulation of the polarization of the foreground galaxy at far-IR ranges and wavelengths less than 1 mm [29, 33–35, 56, 61]. Early optical polarization measurements of gamma-ray bursts (Gamma-ray burst — GRB) are very important in modern astronomy. This is due to the fact that the spectra and light curves of the GRB afterglow correspond to the model of synchrotron radiation, which is strongly polarized (up to 70 %) in a wide frequency range, which has been verified in many astrophysical cases [15, 25, 55]. The polarization of the GRB afterglow in the optical range is small (rarely more than 2 %), and theories of the origin of the optical afterglow must account for this. Although localized areas may have strong magnetic fields and high polarization, the net polarization is small unless the fields are globally aligned. Theoretical estimates predict that early long-lasting GRB afterglows should be polarized up to 3–15 % on time segments (<0.1 days) [45]. However, such early measurements are still lacking, which makes it difficult to verify theoretical estimates.

The first attempts at optical polarization studies in wide star fields were made in 1993 using wide-format Schmidt plates and polarizing films. It aimed to search for blazars on 560 square degrees of the celestial sphere [21, 53, 63]. Determining the polarization of the optical radiation of celestial bodies throughout the entire sphere has not yet been thoroughly done

and remains relevant. Such problems in astrophysics can be solved with high resolution by modern robotic observation technologies in combination with the use of new matrix detectors of optical radiation. Robotic telescopes, in particular, are ideal for long-term studies and observations of fast-moving processes on astrophysical objects.

Research of the GRB, which has the highest energy levels in the Universe after the Big Bang [14], both in the optical and IR ranges, is one of the task lists of the BOOTES network (Burst Observer and Optical Transient Exploring System) [6, 7]. The BOOTES’s main scientific object is the observation of the sky in real time. Polarimetric observations of GRB afterglows are planned to be carried out using polarimeters installed on robotic telescopes of the BOOTES network. The structure, principle of operation, and some test results of the EDIPO (Efficient & Dedicated wide-field Imaging Polarimeter) polarimeter are described in the following sections.

2. PRELIMINARY POLARIMETER REQUIREMENTS

Telescopes of the BOOTES network are independent functional robotic instruments for astronomical observations, thus their design does not provide the use of polarizing elements. Polarization measurements are possible only with the use of an external polarimeter which mechanical and optical parameters are matched with the corresponding parameters of a

Table 1. Main parameters of the telescope-polarimeter system

Parameter	Value
Telescope	Cassegrain with equatorial mounting
Diameter of the main mirror, m	1.4
Effective focal length of the telescope + polarimeter system, mm	4480
Polarimeter numerical aperture F#	3.2
Detector size, in pixels	4000 × 4000
Pixel size, mm	10 × 10
Field of view of the telescope-polarimeter system, arcmin	30 × 30
Image scale, arcsec/pixel	0.44
Spectral range, nm	450–1000
Filters	<i>V, R, I (r, i, z)</i>
Focusing system	Telescope secondary mirror

specific telescope. The EDIPO polarimeter considered in this paper was designed for a telescope with a diameter of the main mirror of 1.4 m and a focal length of 11.2 m. The design of the telescope and its parameters determine the main requirements for the characteristics of the telescope-polarimeter system, which are presented in Table 1.

The ordinary value of the degree of polarization of the observed celestial objects is 2 %. To achieve a polarimetric accuracy of 1 % when observing weak sources, for example, with $R = 18$, the signal/noise ratio in the polarimeter should be at least $S/N = 141$, with a single exposure of 180 seconds. With this exposure, including calibration frames, that take up to 10 % of the whole observation time, 24 square degrees of the celestial hemisphere will be surveyed during an ordinary night of 9 hours. A complete survey of the celestial hemisphere (20 000 square degrees) should be carried out in 5 years, taking into account the days with adverse weather conditions for the observation, the technical simplicity of the equipment, and the duration of the optical transients of the afterglow after the GRB. Based on the polarization measurements, it is planned to select candidates for further studies to obtain different colors and search for optical variability using the Global BOOTES network robotic telescopes [6].

3. CONCEPT OF MEASUREMENTS AND POLARIMETER OPTICAL LAYOUT

3.1. Choose the polarimeter measuring scheme. The design and parameters of the telescope optical system and the specifics of the tasks to be solved (polarization studies of fast-moving processes in several spectral ranges) determined the choice of the polarimeter measurement layout and the concept of designing its optical system. In particular, the measuring part of the EDIPO is based on the approach with the division of the amplitude or aperture (Division of Amplitude/Aperture — DoA) [22, 26, 36–39, 42, 50, 65]. According to the DoA approach, the input beam is divided into several equivalent parts that form spatially separated optical channels. In each channel, the beam passes/reflects through fixed polarizing elements (polarizers, phase plates) before entering the photodetector. In such a schematic implementation, there are no moving elements (at least within one

spectral channel), and the registration of all values that are necessary for the complete characterization of the light polarization is being made in one exposure. This makes it possible to analyze the state of light polarization of fast-moving processes occurring on celestial bodies and in interstellar space. Besides all, the EDIPO is an imaging polarimeter that should allow observing the distribution of polarization over the field of view of the corresponding telescope.

3.2. Description of polarized light and detailing of the EDIPO measurement scheme. For a complete description of light with a certain wavelength with an arbitrary state of polarization, it is convenient to use the Stokes parameters I , Q , U , and V [9, 10]. They can be used to describe the degree of polarization DoP (Degree of Polarization), the azimuth of polarization AoP (Azimuth of polarization), and the angle of ellipticity EoP (Ellipticity of Polarization) of the radiation polarization ellipse:

$$\begin{aligned} \text{DoP} &= \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} / I, \\ \text{AoP} &= \frac{1}{2} \arctg(U/Q), \\ \text{EoP} &= \frac{1}{2} \arctg\left(V / \sqrt{Q^2 + U^2}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

The first Stokes parameter I corresponds to the total radiation intensity. Parameters Q and U determine the predominance of the linearly polarized component in the beam with polarization azimuth 0° , 90° , 45° , and 135° . The parameter V — determines the predominance of components with left or right circular polarization.

The star's light, as well as the light of other emitting celestial bodies, is mostly unpolarized, but due to the scattering of this light by gases, dust, and the surface of celestial bodies, it can acquire partial linear polarization. Therefore, most astronomical polarimeters are focused on the exact determination of the parameters of linear polarization, in particular, the degree of linear polarization (Degree of Linear Polarization — DoLP) and azimuth of linear polarization (Angle of Linear Polarization — AoLP).

The polarization of GRB afterglows is also linear with a different degree and azimuth of polarization. Therefore, when designing EDIPO, emphasis was placed on the accurate determination of the linearly

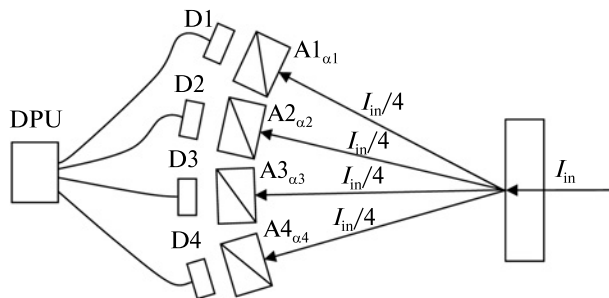


Figure 1. Scheme of a polarimeter with divided of intensity/aperture for measuring the parameters of linearly polarized radiation: I_{in} — the intensity of the incoming beam, $A_{n\alpha}$ — linear analyzer (polarizer) of the n -th channel with azimuth αn , D_n — photodetector in the n -th channel, DPU (Data Processing Unit) is a data collection and processing unit

To determine Stokes parameters in DoA polarimeters, a common approach that is schematically depicted in (Fig. 1), is used. The polarimeter’s separation system divides its aperture into four equivalent parts, forming four independent spatial optical channels. In each channel, the beam, before entering the photodetector, passes through an analyzer (a linear polarizer with a fixed azimuth). It is common to orient the azimuths of the analyzers in the optical channels at the angles $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ and 135° . Then, the Stokes parameters of light at the input of the polarimeter are calculated as:

$$\begin{aligned} I &= I_0 + I_{90} = I_{45} + I_{135}; \\ Q &= I_0 - I_{90}; \quad U = I_{45} - I_{135}, \end{aligned} \quad (3)$$

where $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{135}$ — light intensity at the analyzer output with the corresponding azimuth.

3.3. The EDIPO polarimeter optical layout model.

The EDIPO optical layout is shown in Figure 2, *a*, and its cross-section is in Figure 2, *b*. It allows the implementation of the described measuring scheme (Fig. 1). In Figure 2, the image of the observed object field (field) is formed in the focal plane of the telescope. The collimator of the polarimeter forms an image of the telescope’s entrance pupil and directs it through a combined polarization analyzer (a set of linear polarizers with the required orientation) and a spectral filter to the pupil division system. The polarization analyzer shown in Fig. 2, *b* is divided into four segments of equal size. It is placed in front of the mirror division system, but, in fact, it already divides the focal plane into four parts, each of which passes through a polarizing element (a sequence of elements). Next, the mirror division system spatially divides the parts, which are then focused on the detectors by four camera lenses. To determine the parameters of linear polarization, a linear polarizer with the required orientation of the transmission axis or an equivalent system of polarization converters (prisms, films, plates) must be installed in each segment of the analyzer in Fig. 2, *b*. If it is necessary to measure full light polarization parameters, additional waveplates can be installed in the analyzer sectors of Fig. 2, *b*. The intensity of the split light is registered by the detectors. It is used to calculate the Stokes parameters using equation (3).

3.4. Detailing the design and parameters of EDIPO optical elements. The structural and optical param-

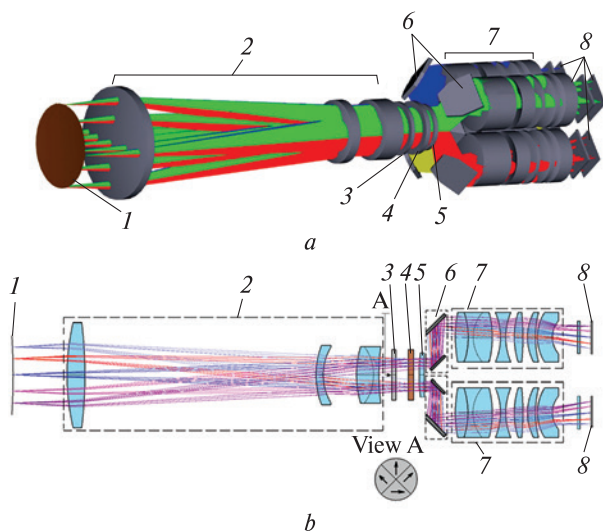


Figure 2. EDIPO polarimeter optical layout model (*a*) and its sectional view (*b*). Two polarization channels 0° and 90° are shown: 1 — telescope focal plane, 2 — collimator, 3 — polarization analyzer, 4 — spectral filter, 5 — field lens, 6 — mirror division system, 7 — camera lenses, 8 — detectors

polarized light parameters. For a complete description of linearly polarized light, the first three Stokes parameters are sufficient. They make it possible to characterize the intensity of light I , the degree of DoLP, and the azimuth of AoLP polarization [9]:

$$\begin{aligned} \text{DoLP} &= \sqrt{Q^2 + U^2} / I, \\ \text{AoLP} &= \frac{1}{2} \arctg(U / Q). \end{aligned} \quad (2)$$

eters of the telescope (Table 1) and the tasks to be solved are mentioned above, specifying the structure of the optical system and the parameters of the polarimeter elements. The key parameters of the EDIPO optical system are listed in Table 2.

A detailed description, purpose, and possible implementation of elements of the EDIPO's optical system are given below.

The polarimeter collimator consists of four spherical lenses. The linear field of view of the collimator is 97×97 mm. It forms an image of the telescope's main mirror (pupil) with 60 mm diameter. The effective focal length of the collimator is 455 mm, the total length is 550 mm.

Spectral filters. To provide multispectral polarimetric measurements in the range of 450–1000 nm, the replaceable spectral filters V , R , I (r , i , z) are supposed.

Polarization analyzer. High-quality optical polarization analyzers are based on birefringent prisms [1, 11, 42]. The possible design of combined segmented prism analyzers of the type shown in Fig. 2, *b* is described in [13, 22]. Thus, in [40], this analyzer is built based on the use of a pair of two-beam Wollaston polarizing prisms, the optical axes of which are oriented at an angle of 45° to each other, and the prisms themselves fill sectors 1-2 and 3-4, respectively, and have an efficiency equal to 100 %. In [40], a double wedge

Table 2. EDIPO optical system parameters

Parameter	Value
Spectral range, nm	450–1000
Camera lens aperture ratio D/f	1/3.2
Collimator diameter, mm max/min	160/84
Collimator length, mm	600
Number of collimator lenses	4
Camera lens length, mm	160
Camera lens diameter, mm	76
Number of camera lens lenses	7
Polarimeter pupil diameter, mm	60
Mirror division system diameter, mm	180
Number of detectors,	4
Detector size, pixels	4000 × 4000
Pixel size, mm	10
Polarimeter aperture ratio D/f	3.2

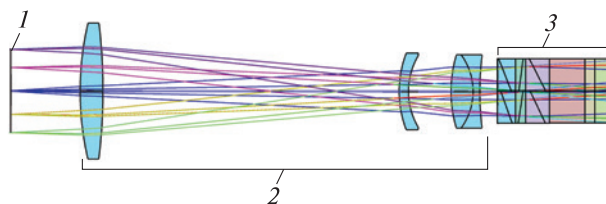


Figure 3. Ray's propagation in the part of polarimeter optical system collimator — polarization analyzer for option the analyzer based of achromatized Wollaston prisms: 1 — telescope focal plane, 2 — collimator, 3 — double Wollaston prism

Wollaston prism was proposed to determine the first three Stokes parameters of linearly polarized light. In [39, 43, 47, 51], in addition to the array of Wollaston prisms, a quarter wave plate is also used as a polarization analyzer to determine all Stokes parameters. However, the own dispersion of the prisms requires the use of additional compensation wedges. The [28] presents the development of a polarimeter based on pairs of Wollaston prisms, which use a system of wedges for dispersion compensation.

The advantage of using polarizing prisms based on birefringent crystals is the highest polarization contrast (extinction ratio) ($1:10^5 \dots 1:10^6$) and the lowest absorption in a wide range of wavelengths (300–2500 nm) compared to other types of linear polarizers.

Thus, the use of polarizing prisms for the design of the segmented polarizer EDIPO (Fig. 2, *b*) was also considered. In particular, the optical system of the polarimeter was modeled, where the analyzer is built on the basis of a pair of Wollaston prisms. The optical axes are at an angle of 45° relative to each other. One of the disadvantages of Wollaston prisms is the dependence of the angle between the ordinary and extraordinary output rays on the wavelength of the input light. Simulation shows that achromatization of the Wollaston prism in the spectral range of EDIPO operation (450–1000 nm) is possible. For that purpose, one should be three-component. It is also necessary to use additional compensating prisms, which should include at least 3 wedges. The path of rays in the optical system of the polarimeter in the collimator-analyzer part, if the design of the analyzer is based on achromatic Wollaston prisms, is presented in Fig. 3.

Figure 4 show the structure and dimensions of the analyzer unit based on two Wollaston prisms with

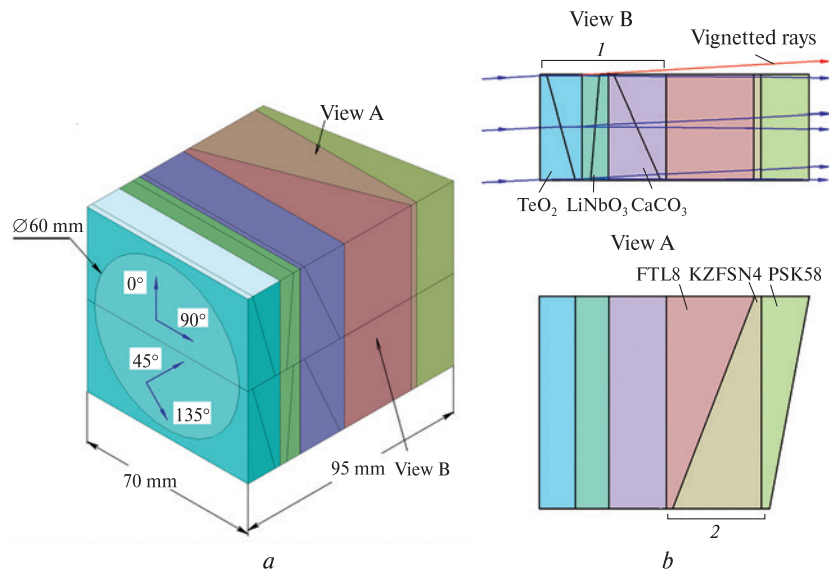


Figure 4. General view of the of Wollaston prisms unit with compensating wedges (a) and composition of one Wollaston prism with compensation wedges (b). B — side view, A — top view

compensating wedges. Figure 4, *a* shows the general view of the analyzer, and Figure 4, *b* shows the appearance and composition of one of its prisms. The appropriate combination of birefringent crystals and crystals is CaCO₃ + LiNbO₃ + TeO₂. This combination, together with the PSK58 + KZFSN4 + FTL8 (Schott and Ohara) glass apochromatic wedge system, can deflect light beams at angles up to 6° and forms two channels (camera lens, detector) for analyzing the polarized light parameters.

With a light diameter of 60 mm, the total thickness of the analyzer unit in Fig. 4, *a* should be 95 mm. The analyzer in Fig. 4, *a* is equivalent to the segmented analyzer in Fig. 2, *b*. Each prism of the block in Fig. 4, *a* forms two adjacent segments of the analyzer in Fig. 2, *b* (1-2 and 3-4).

The main disadvantages of the considered analyzer are:

- large dimensions,
- vignetting of rays at the edge of two adjacent Wollaston prisms (for edge rays can be up to 20–25 %),
- different dispersion of Wollaston prisms for two orthogonal directions of light propagation, as a result of which the images of the object constructed by camera lenses are not identical.

The analysis showed that it would be technologically difficult to ensure the necessary homogeneity and uniformity of Wollaston prism parameters within the light beam diameter of 60 mm and wavelength range of 400–1000 nm. The errors caused by these imperfections will be difficult to account for and will greatly complicate the calibration procedure. Furthermore, it is expected the described assemble would be too expensive. Therefore, the use of considered prism analyzers is impractical.

As an alternative way, the design of a segmented analyzer based on polarization cubes with a polarization multilayer coating was also analyzed [44]. The design of the segmented analyzer proposed by the authors is presented in Fig. 5. As can be seen, the specified system is cumbersome and structurally complex. The main advantage of using polarization cubes is their relatively low cost compared to Wollaston prisms. At the same time, the cubes have a selective transmittance and cannot cover wide spectral ranges. On the other hand, the complexity of assemble configuration Fig. 5 precludes a quick change of cubes for different ranges, which also makes this solution unsuitable for use in EDIPO.

The use of polarizing films simplifies the design of the segmented analyzer significantly. All we have to

do is place polarizing films with a given azimuth of the transmission axis in the corresponding segments of the analyzer (Fig. 2, *b*). The polarization analyzer commonly installed in the image plane of the entrance pupil (main mirror of the telescope), which is formed by a system of parallel rays, with angles of incidence different from 0° . The actual value of the incidence rays' angle on the segments of the analyzer, on the one side, is determined by the constructive displacement of the segments relative to the optical axis of the polarimeter, on the other side, by the actual field of view (FOV) of the telescope.

With a wide FOV, vignetting of oblique field rays occurs at the edges of contact of the analyzer segments. The thicker the polarization analyzer, the greater the vignetting (see Fig. 4, *b*). The use of films minimizes the thickness of the analyzer and, accordingly, additional vignetting since the range of permissible input angles of polarizing films is tens of degrees, which is an order more than available for prism polarizers and polarizing cubes.

The disadvantage of polarizing films, operating in a wide spectral range, for example, 400–700 nm, is relatively low transmittance (actually below 47 %) and relatively low polarization contrast that does not exceed $1:10^4$ [https://www.edmundoptics.com/f/high-contrast-linear-polarizing-film/14385/]. However, polarizing films, operating in narrow spectral ranges, have a polarization contrast greater than $1:10^4$ and a transmittance of 60–80 %. The use of a set of narrow-band polarization films for several wavelength ranges will allow covering the spectral range of 450–1000 nm [https://www.codixx.de/en/colorpolr-polarisationen/uv-polarisatoren]. A significant advantage of using the polarizing films-based segmented analyzers is the simplicity of replacing analyzers simultaneously with a spectral filter when changing the desired spectral range during the observation process.

Taking into account the disadvantages and advantages of the considered different implementations of segmented polarization analyzer, the EDIPO analyzer was designed with the use of codixx VIS 500 BC4 and VIS 700 BC4 polarization films, which overlap the spectral range 550–1100 nm.

The field lens (Fig. 1, 2) has a low optical power of $1/f \approx 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ and is installed in front of

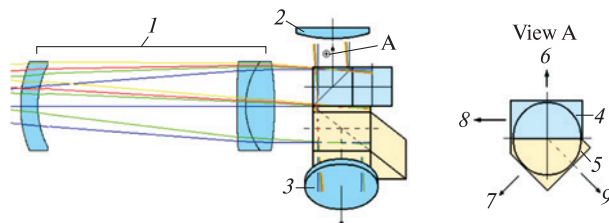


Figure 5. Segmented polarization analyzer based on polarization cubes: 1 – collimator, 2 – camera lens 0° , 3 – camera lens 45° , 4 – polarizing cube $0^\circ\text{--}90^\circ$, 5 – polarizing cube $45^\circ\text{--}135^\circ$, 6 – to camera lens 0° , 7 – to camera lens 45° , 8 – to camera lens 90° , 9 – to camera lens 135°

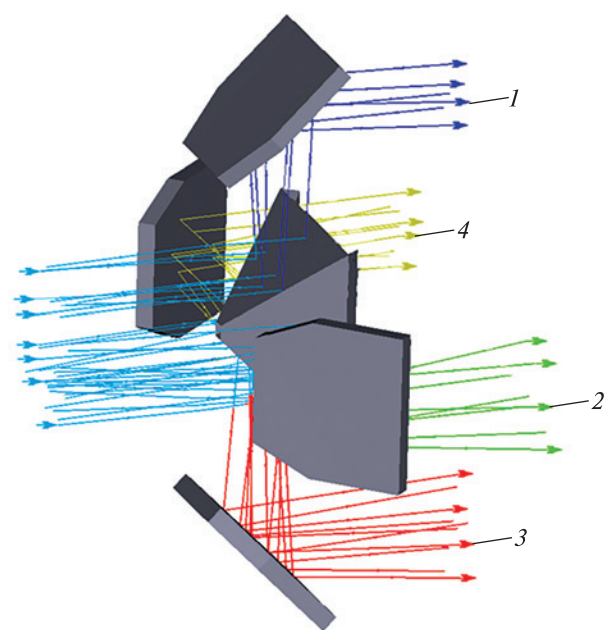


Figure 6. Mirror division system: 1 – to camera lens 0° , 2 – to camera lens 45° , 3 – to camera lens 90° , 4 – to camera lens 135°

the mirror division system. It is intended to reduce the diameter of the off-axis beams, which are then spread in the optical system.

Mirror division system. The polarimeter has a mirror division system for the spatial division of input light parts that have passed through the corresponding segments of the analyzer. It consists of a pyramid with four reflective faces and four mirrors (Fig. 6). Each pyramid surface is positioned to reflect part of the light that has passed through a certain segment of the analyzer onto one of the mirrors. Next, the di-

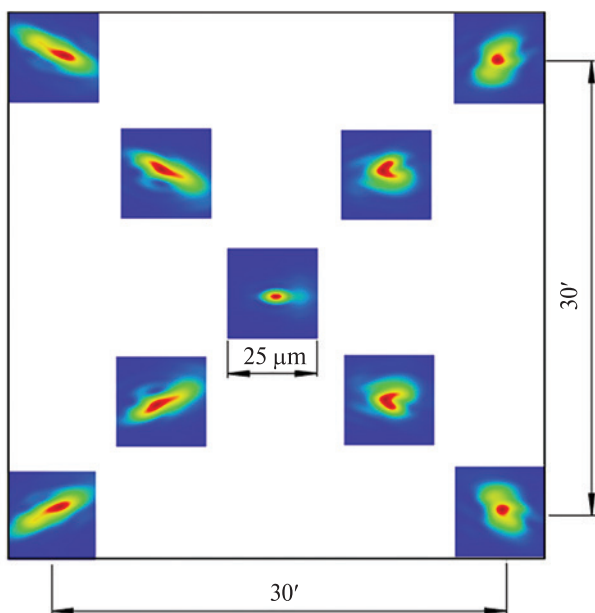


Figure 7. Model spot diagrams (artificial star) in the focal plane of a camera lens

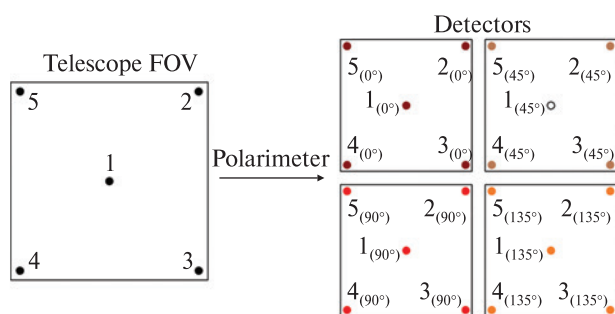


Figure 8. Forming of the input field image on EDIPO matrix detectors

vided rays are directed by mirrors into four camera lenses. In this way, four spatially divided channels are obtained, and the light of each is registered by the detector. This mirror system does not have chromatic aberrations, unlike, for example, the wedge system [54, 57, 58], and its location after the analyzer (along the path of light propagation) does not affect the determination of the input light polarization parameters. The contribution of the system to the effective values of the transmission coefficients of the polarimeter channels will be automatically taken into account during calibration.

Camera lenses. The general view of the camera lens optical system is shown in Fig. 2, a. Each camera lens consists of a triplet and four single lenses. The focal length of the lens is 225 mm, the maximum light diameter of lenses is 76 mm. After passing through the mirror division system, $\frac{1}{4}$ of the total light goes to each camera lens. At the same time, the light diameters have an asymmetric shape, and therefore, asymmetric spots are formed in the camera lenses' focal planes. In Fig. 7, the model spot diagrams (artificial star), which are formed by the polarimeter optical system in the focal plane of one of the four camera lenses, are presented. Spots are modeled for different coordinates of the FOV (center, middle, edge). The scale of the figure is 30', which corresponds to the telescope FOV. In Fig. 7, the scale of spots has been increased to better illustrate the distribution of asymmetry along the plane of the detector. As shown in Fig. 7, the difference in the spot size in the center and on the corner does not exceed 1 pixel (10 μm) in the focal plane of the camera lens.

Detectors. A matrix detector is placed in the focal plane of each of the four camera lenses. Schematically, the correspondence of the points on the polarimeter matrix detector to the points of the input field of the polarimeter is shown in Fig. 8. In the right part of the figure, the numbers in brackets indicate which segment of the analyzer this spatial channel corresponds to. The asymmetry of the shape of the light rays in the camera lenses leads to different asymmetry of the spots in the corresponding spatial channels of the polarimeter, which can be compensated for by geometrical calibration of the polarimeter.

4. POLARIMETER MECHANICAL DESIGN

Details and features of the EDIPO polarimeter design, which implements the concept discussed in the previous section, are given below.

The design simulation of the instrument is shown in Fig. 9. The polarimeter consists of the units: the collimator unit 1, the unit of polarizers and spectral filters 2, the mirror division system unit 3, the camera lens unit 4, and the matrix detector.

The front part of the polarimeter contains a collimator tube, which consists of two parts. The first collimator lens is installed in the first part of the tube. The rear part of the tube is centered and attached to

the unit of polarizers and spectral filters. Structurally, other collimator lenses are attached to the unit of polarizers and spectral filters. The tolerance for centering the collimator lenses is 0.1 mm and is fully achievable in the design.

The unit of polarizers and spectral filters is a composite frame. It has three wheels which have 6 positions each. The main wheel is for polarizers, the others are for spectral selection elements (spectral filters, transmissive diffraction gratings). Changing the elements' position in each wheel is carried out using stepper motors. A field lens is coaxial with the optical axis of the collimator, and it is also attached to the unit. A collimator is attached to the unit's front part, and the mirror division system is attached to the unit's rear part.

The model of the mirror division system unit in section 3/4 is presented in Fig. 10, *a*. The elements of the system are a mirror pyramid, which consists of four separate mirrors glued to an aluminum pyramid, four units of diagonal mirrors, and a frame. The design includes a system of adjusting screws. The additional baffles are provided between adjacent mirror faces in the mirror pyramid to block the stray light.

The camera lens unit is presented in Fig. 10, *b*. It consists of four lenses of the same type placed in a housing. The design allows you to focus each lens separately during adjustment and adjust the unit as a whole. The camera lens unit is connected to the mirror division system unit by the flange of the left part (relative to the ray propagation). The unit is connected to the detector with the right flange.

5. ADJUSTMENT AND PRELIMINARY EXPERIMENTAL RESULTS

Simulation of the errors in the alignment of optical elements of the polarimeter has provided to separate the most critical of them. As a result, the permissible deviations of the design parameters and spatial positions of these optical elements were determined. The most stringent requirements are defined for the spatial placement of the mirrors of the division system and the relative placement of the camera lens lenses. The error in the spatial arrangement of the faces of the monolithic pyramid and the fold mirrors of the division system is <3 arcsec, and the error in the relative location of the lenses of the camera lenses is <0.1 mm.

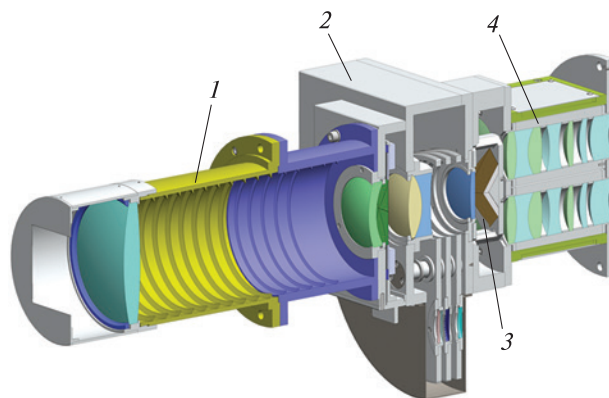


Figure 9. Design simulation of the EDIPO polarimeter: 1 — collimator unit, 2 — unit of polarizers and spectral filters, 3 — mirror division system unit, 4 — camera lens unit

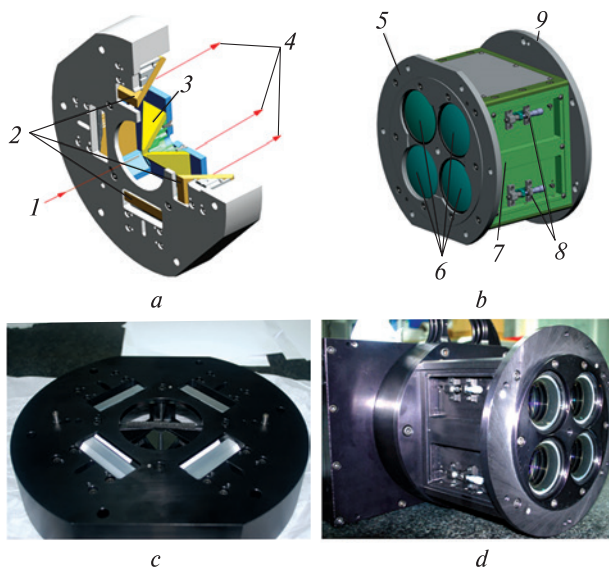


Figure 10. Mirror division system unit (*a*) and camera lenses unit (*b*) of EDIPO polarimeter and its general view (*c*, *d* respectively): 1 — input light, 2 — fold mirrors, 3 — mirror pyramid, 4 — output light, 5 — flange to mirror division system, 6 — camera lenses, 7 — housing, 8 — mechanism for adjustment, 9 — flange to detector

All the design elements of the EDIPO polarimeter were produced by Added Value Solutions company (AVS) <https://www.a-v-s.es/>. The assembly and adjustment of the polarimeter were also carried out in the optical laboratory of the company according to the correspondingly developed procedures. For the

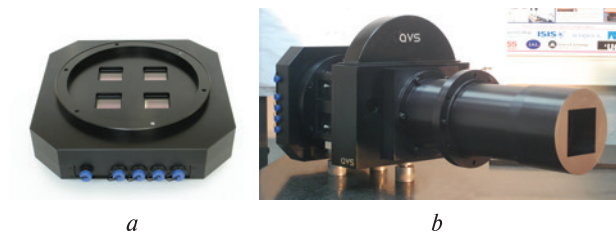


Figure 11. EDIPO camera and control electronics unit assembly (a) and general view of the assembled EDIPO polarimeter (b)

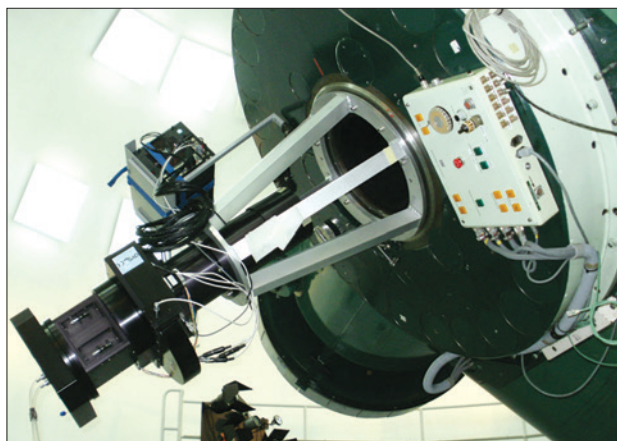


Figure 12. Stokes polarimeter EDIPO installed on the telescope of the Caral Alto Observatory

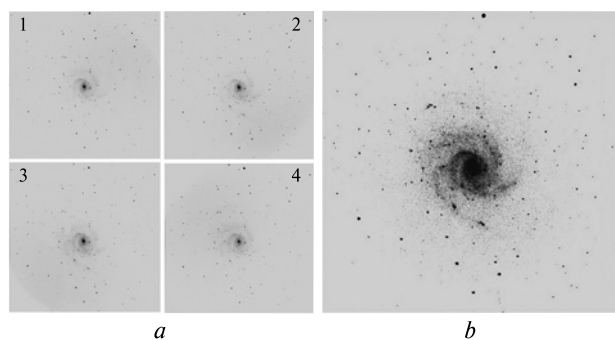


Figure 13. Four images of the sky around galaxy M101 on polarimeter detectors 1–4 (a) and central part of the polarimeter's FOV, obtained as a result of the sum of this four images (b)

intermediate step of checking each camera lens unit, the classic method was used. The “artificial star” in the focal plane of the collimator was installed, the image of which was then analyzed by each lens. The results of testing the camera lenses showed a correlation between real and modeled image quality parameters (Fig. 7).

The spatial position of each fold mirror relative to the corresponding face mirror of the pyramid was controlled by the collimation method. This ensured the necessary accuracy in the relative location of the mirror faces of the prism and the rotating mirrors within 3 arcsec.

For the polarimeter, a camera containing four separate matrix detectors was developed (Fig. 11, a). The control electronics unit and detectors are made in a single housing. The size of each detector is 4000×4000 pixels with a pixel size of $10 \mu\text{m}$.

The general view of the assembled EDIPO polarimeter is shown in Figure 11, b.

The first images on the polarimeter were obtained at the Caral Alto observatory using a telescope with a mirror diameter of 1.2 m [<https://www.caha.es/CAHA/Telescopes/1.2m.html>] (Fig. 12). The images of the sky were obtained without the use of polarizers. We estimated only the image quality at this stage.

Figure 13, a shows images of 1–4 of the polarimeter detectors when observing the area of the sky around the galaxy M101. Figure 13, b shows the result of the sum of images 1–4 (displays the double value of the intensity distribution through the observed scene). Figure 13, b shows an enlarged central part of the FOV with an image of the M101 galaxy to illustrate the resolution of the polarimeter-telescope system.

6. GEOMETRIC AND POLARIZATION CALIBRATION EDIPO

The next step to ensure the full functioning of EDIPO as a part of the telescope is the geometric and polarization calibration. In this case, the essence of geometric calibration is to estimate offsets of pixel coordinates in each of the four received images.

For this purpose, it is planned to use a laboratory calibration stand with an image of a “checkerboard” type structure [41] or chess mates [3, 64] with subsequent localization of the coordinates of the

“checkerboard” nodes on the images in the EDIPO channels. There are techniques of geometric calibration based on using reference light sources with a well-defined direction of view [4] and that utilize precise turntables [8, 17]. The final relative values of coordinate offsets in the channels will be determined by averaging the offsets obtained for the nodes of the calibration image. The maximum distortion of the EDIPO optical system is 1.2 %, so its compensation is provided according to the method proposed by the authors in [32].

Polarization imperfections of the optical system of the telescope and polarimeter (birefringence in the lenses caused by mechanical stresses in their material), errors in the orientation of the polarizing films in the analyzer segments, the finite polarization contrast of the polarizing films, the difference in the photoelectric characteristics of the detectors will increase the systematic polarimetric error of the system. The influence of these negative factors on the polarization measurements of polarimeters is usually described by the instrumental matrix [62] or instrumental polarizations [5, 13]. Determining the instrumental matrix/polarizations of the polarimeter and using it to adjust the results of subsequent measurements is the essence of polarimetric calibration.

For the polarimetric calibration of the telescope-EDIPO system, the approach described in [32, 59] can be partially used. The measurement equation of the system for each pixel of the input image has the form:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_{90} \\ I_{45} \\ I_{135} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & a_1 \cos 2\varepsilon_1 & a_1 \sin 2\varepsilon_1 \\ 1 & -a_2 \cos 2\varepsilon_2 & -a_2 \sin 2\varepsilon_2 \\ 1 & -a_3 \sin 2\varepsilon_3 & a_3 \cos 2\varepsilon_3 \\ 1 & a_4 \sin 2\varepsilon_4 & -a_4 \cos 2\varepsilon_4 \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_{inst}} \cdot \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}, \quad (4)$$

where I, Q, U — Stokes parameters for an image within a pixel, indices — 0, 90, 45, 135, indicate the corresponding spatial (polarization) channels $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ$; $I_0 = ARD_0, I_{90} = AK_1RD_{90}, I_{45} = AK_2RD_{45}, I_{135} = AK_3RD_{135}$ — are the light intensities on the detector pixels of the corresponding spatial channel. At the same time $RD_{0, 90, 45, 135} = R_{0, 90, 45, 135} - D_{0, 90, 45, 135}$ data from the analog-to-digital converter (ADC) of the EDIPO camera corrected for the offset of the

“electrical zero”, $D_{0, 90, 45, 135}$ — determines the dark signal level (“electrical zero”) of the detector when the EDIPO input light is blocked, A — is a radiometric coefficient for converting digital ADC values into an absolute radiometric scale, if necessary, $K_1 - K_3$ coefficients, compensating for the difference in signals at EDIPO detectors when observing a non-polarized source, e_n — polarization contrast of polarizing films in the analyzer segments ($0^\circ + \varepsilon_1, 90^\circ + \varepsilon_2, 45^\circ + \varepsilon_3, 135^\circ + \varepsilon_4$) (Fig. 2, b), $a_n = (e_n - 1)/(e_n + 1)$ — effective factor that takes into account the finite polarization contrast of polarizing films of the EDIPO analyzer, ε_n — effective angular errors in setting the azimuths of polarizers in the analyzer segments.

The corresponding coefficients are effective values since they take into account the effect on the polarization measurements of both the EDIPO elements and the telescope. \mathbf{M}_{inst} in eq. (4) is the instrumental matrix of the telescope-EDIPO system. Note that the form of measurement equation (4) is general for all points of the input image of the system. At the same time, each point of the input image corresponds to its own numerical instrumental matrix.

Calibration procedures are described in [32], which allow determining the coefficients of the instrumental matrix in (4) at laboratory conditions. However, the use of such procedures is impossible for the telescope-EDIPO system due to the stationary placement and significant dimensions of the entire measuring system. In astronomical research, the instrumental matrix or polarization is determined using observations of standard stars with low polarization [13, 16].

When observing the source of unpolarized radiation in (4), it becomes possible to determine the values of the coefficients $K_1 - K_3$ as:

$$K_1 = \frac{RD_{90}}{RD_0}, \quad K_2 = \frac{RD_{45}}{RD_0}, \quad K_3 = \frac{RD_{135}}{RD_0}. \quad (5)$$

It will obviously be necessary to determine the value of these coefficients for a discrete set of different angles of observation of the source and to carry out an approximation over the entire field of view based on the discrete values.

To determine the instrumental matrix \mathbf{M}_{inst} , it is necessary to measure the intensities in the EDIPO channels when observing three different polarization

standard stars, which have maximally different and well-known light polarization azimuths. Then, the expression for determining the instrumental matrix of the telescope-EDIPO system will have the form:

$$\mathbf{M}_{inst} = \begin{bmatrix} I_0^{(1)} & I_0^{(2)} & I_0^{(3)} \\ I_{90}^{(1)} & I_{90}^{(2)} & I_{90}^{(3)} \\ I_{45}^{(1)} & I_{45}^{(2)} & I_{45}^{(3)} \\ I_{135}^{(1)} & I_{135}^{(2)} & I_{135}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^{(1)} & I^{(2)} & I^{(3)} \\ Q^{(1)} & Q^{(2)} & Q^{(3)} \\ U^{(1)} & U^{(2)} & U^{(3)} \end{bmatrix}^{-1}, \quad (6)$$

where the lowercase letter (m) denotes the values determined for the m-th polarization standard.

One of the advantages of the described procedure is the automatic accounting of atmospheric effects in the instrumental matrix (6), which can also lead to additional instrumental polarization in the case of the possibility of its practical implementation.

7. RESULTS AND DISCUSSION

One of the tasks of the EDIPO polarimeter design is to ensure its versatility and multifunctionality. The polarimeter should ensure the operation of the telescope in the photometric multispectral mode and the mode of polarization measurements. To ensure this functionality, the design of the polarimeter involves the installation of a unit of polarizers and spectral filters (Fig. 9). These units include three wheels with fixed spectral filters, polarization analyzers, phase plates, or a combination of them. To ensure astronomical observations, one of the wheel's hole positions can be empty or contain a fused silica window. Since the polarimeter collimator forms a system of parallel beams, only elements that work in converging beams — narrow-band interference filters and diffraction gratings — can be installed in the wheel. Any combination of filters, film polarizers, phase plates, and diffraction gratings can be inserted into the pupil sectors.

The versatility of EDIPO requires a multi-step setup and testing process. The first step, the results of which are presented above, involved the optical adjustment of EDIPO on the telescope of the Calar Alto Observatory with a main mirror diameter of 1.2 m (Fig. 12) to ensure their full compatibility, without spectral filters and polarizing elements. As a result, test observations showed that the optical aberrations of EDIPO agree with the calculated values

for the four channels of the polarimeter. The difference in the geometric parameters of the images in the channels does not exceed 1 pixel.

In this way, the complete compatibility of the optical parameters of the polarimeter and the telescope was established, which allows them to be used in a complex for conducting astronomical observations. At the same time, parallel measurements in four EDIPO channels of equivalent images of objects can be used for an additional 4-fold averaging of the observed picture without increasing the exposure time.

In the next step, photometric and polarimetric calibration of EDIPO is planned following the procedure described in the previous section using celestial stellar standards.

Although the analysis of the light polarization parameters is performed simultaneously for the entire FOV in the polarimeter, to ensure multispectral measurements using EDIPO in the range of 450–1000 nm, it will be necessary to change the spectral filters and polarization analyzers by rotation of the wheels. This disadvantage can be partially eliminated by using combined spectral filters or diffraction gratings as spectrally selective elements, as in the HARP case [30], for instance. However, such a decision will inevitably lead to a decrease in the resolution of the proportional to the increase in the number of simultaneously registered spectral channels.

8. CONCLUSIONS

The EDIPO imaging polarimeter was developed, intended for use in conjunction with astronomical telescopes of the BOOTES network to study the polarization features of the rapid processes of the afterglow of gamma-ray bursts (GRB).

The design of the polarimeter, optical parameters, and the choice of measurement scheme are determined by the design features of the BOOTES network telescopes and the specifics of the polarization studies. The possibility of studying polarization distributions in fast light-emitting processes is provided by a one-moment analysis of the polarization of the observed scene in four azimuthal directions of 0°, 45°, 90° and 135°.

The design of EDIPO allows it to be used as a conventional telescope registration system and as a

spectrophotometer and polarimeter after appropriate calibration. Such universality is provided by the use in the design of the polarimeter changeable wheels with elements of spectral selection and polarization analyzers.

The polarimeter was manufactured, assembled, and tested in the AVS optical laboratory. Test observations of celestial objects were carried out at the

Calar Alto observatory on a telescope with a main mirror diameter of 1.2 m. Testing was carried out in non-polarization mode. The experimentally demonstrated image quality is in agreement with the theoretical assessments.

Further work involves testing the polarimeter in polarization mode using celestial polarization standards.

REFERENCES

1. Afanasiev V. L., Shablovinskaya E. S., Uklein R. I., Malygin E. A. (2021). Stokes-Polarimeter for 1-m Telescope. *Astrophys. Bull.*, **76**(1), 102–108. DOI: 10.1134/S1990341321010028.
2. Angel J. R. P., Stockman H. S. (1980). Optical and infrared polarization of active extragalactic objects. *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*, **18**, 321–361. DOI: 10.1146/annurev.aa.18.090180.001541
3. Bauer M., Griebßbach D., Hermerschmidt A., Krüger S., Scheele M., Schischmanow A. (2008). Geometrical camera calibration with diffractive optical elements. *Opt. Express*, **16**, 20241–20248. DOI: 10.1364/OE.16.020241.
4. Bret-Dibat T., Andre Y., Laherrere J. M. (1995). Preflight calibration of the POLDER instrument. *Proc. SPIE*, **2553**, 218–231.
5. Cairns B., Russell E. E., Travis L. D. (1999). Research Scanning Polarimeter: calibration and ground-based measurements. *Proc. SPIE*, **3754**, 186–196. DOI: 10.1117/12.366329
6. Castro-Tirado A. J., Cunniffe R., de Ugarte Postigo A., Jelínek M., Vitek S., Kubánek P., Gorosabel J., Castillo Carrión S., Mateo Sanguino T. J., Riva A., Conconi P., di Caprio V., Zerbi F., Amado P., Cárdenas C., Claret A., Guziy S., Martín-Ruiz S., Sánchez M. A., García Teodoro P., Castro Cerón J. M., Díaz Verdejo J., Hudec R., López Soler J. M., Berná Galiano J. Á., Casares J., Fabregat J., Páta P., Sánchez Fernández C., Sabau-Graziati M. D., Trigo-Rodríguez J. M., Vitali F. (2006). BOOTES-IR: a robotic nIR astronomical observatory devoted to follow-up of transient phenomena. *Proc. SPIE*, **6267**, 62670I. DOI: 10.1117/12.671579.
7. Castro-Tirado A. J., Soldán J., Bernas M., Páta P., Rezek T., Hudec R., Sanguino T. M., de la Morena B., Berná J. A., Rodríguez J., Peña A., Gorosabel J., Más-Hesse J. M., Giménez A. (1999). The Burst Observer and Optical Transient Exploring System (BOOTES). *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, **138**, 583–585. DOI: 10.1051/aas:1999362.
8. Chen L. G., Zheng X. B., Hong J., Qiao Y. L., Wang Y. J. (2010). A novel method for adjusting CCD camera in geometrical calibration based on a two-dimensional turntable. *Optik*, **121**, 486–489. DOI: 10.1016/j.ijleo.2008.08.004.
9. Chipman R. A., Lam W. S. T., Young G. (2018). *Polarized Light and Optical Systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group. Ser.: Optical Sciences and Applications of Light, 1036 p. ISBN 9781351129121. DOI: 10.1201/9781351129121.
10. Collett E. (2005). *Field Guide to Polarization*. SPIE Press, 134 p. ISBN: 9780819458681
11. Collins P., Redfern R. M., Sheeha B. (2008). Design, Construction and Calibration of the Galway Astronomical Stokes Polarimeter (GASP). *AIP Conf. Proc.*, **984**, 241–246. DOI: 10.1063/1.2896936.
12. Crutcher R. M., Wandelt B. D., Heiles C., Falgarone E., Troland T. H. (2010). Magnetic Fields in Interstellar Clouds from Zeeman Observations: Inference of Total Field Strengths by Bayesian Analysis. *Astrophys. J.*, **725**, 466–479. DOI: 10.1088/0004-637X/725/1/466.
13. Devogèle M., Cellino A., Bagnulo S., Rivet J. P., Bendjoya P., Abe L., Pernechele C., Massone G., Vernet D., Tanga P., Dimur C. (2017). The Calern Asteroid Polarimetric Survey using the Torino polarimeter: assessment of instrument performances and first scientific results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **465**, 4335–4347. DOI: 10.1093/mnras/stw2952
14. Fishman G. J., Meegan C. A. (1995). Gamma-Ray Bursts. *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*, **33**, 415–458. DOI: 10.1146/annurev.aa.33.090195.002215.
15. Götz D., Laurent P., Lebrun F., Daigne F., Bošnjak Ž. (2009). Variable polarization measured in the prompt emission of GRB 041219A using IBIS on board integral. *Astrophys. J.*, **695**, L208. DOI: 10.1088/0004-637X/695/2/L208.
16. Heiles C. (2000). 9286 Stars: Agglomeration of Stellar Polarization Catalogs. *Astron. J.*, **119**(2), 923–927. DOI: 10.1086/301236
17. Huang C., Meng B., Chang Y., Chen F., Zhang M., Han L., Xiang G., Tu B., Hong J. (2020). Geometric calibration method based on a two-dimensional turntable for a directional polarimetric camera. *Appl. Opt.*, **59**(1), 226–233. DOI: 10.1364/AO.59.000226.

18. Ivanova O. V., Dlugach J. M., Afanasiev V. L., Reshetnyk V. M., Korsun P. P. (2015). CCD polarimetry of distant comets C/2010 S1 (LINEAR) and C/2010 R1 (LINEAR) at the 6-m telescope of the SAO RAS. *Planet. and Space Sci.*, **118**, 199–210. DOI: 10.1016/j.pss.2015.05.009
19. Ivanova O., Rosenbush V., Afanasiev V., Kiselev N. (2017). Polarimetry, photometry, and spectroscopy of comet C/2009 P1 (Garradd). *Icarus*, **284**, 167–182. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.11.014.
20. Ivanova O., Rosenbush V., Luk'yanyk I., Kolokolova L., Kleshchonok V., Kiselev N., Kirk Z. R. (2021). Observations of distant comet C/2011 KP36 (Spacewatch): photometry, spectroscopy, and polarimetry. *Astron. and Astrophys.*, **651**, A29. DOI: 10.1051/0004-6361/202039668.
21. Jannuzi B. T., Green R. F., French H. (1993). An optical polarization survey for BL Lacertae objects and highly polarized quasars. *Astrophys. J.*, **404**, 100–111. DOI: 10.1086/172262
22. Kawabata K. S., Nagaie O., Chiyonobu S., Tanaka H., Nakaya H., Suzuki M., Kamata Y., Miyazaki S., Hiragi K., Miyamoto H., Yamanaka M., Arai A., Yamashita T., Uemura M., Ohsugi T., Isogai M., Ishitobi Y., Sato S. (2008). Wide-field one-shot optical polarimeter: HOWPol. *Proc. SPIE*, **70144L**. DOI: 10.1117/12.788569
23. Kolokolova L., Kimura H., Kiselev N., Rosenbush V. (2007). Two different evolutionary types of comets proved by polarimetric and infrared properties of their dust. *Astron. and Astrophys.*, **463**(3), 1189–1196. DOI: 10.1051/0004-6361:20065069.
24. Li H.-B. (2021). Magnetic Fields in Molecular Clouds — Observation and Interpretation. *Galaxies*, **9**(2), 41. DOI: 10.3390/galaxies9020041
25. Lin H.-N., Li X., Chang Z. (2017). Polarization of gamma-ray burst afterglows in the synchrotron self-Compton process from a highly relativistic jet. *Chinese Phys.*, **41**(4), 045101. DOI: 10.1088/1674-1137/41/4/045101
26. Llull P., Myhre G., Pau S. (2011). Lens array Stokes imaging polarimeter. *Meas. Sci. Technol.*, **22**, 065901. DOI: 10.1088/0957-0233/22/6/065901
27. Magalhães A. M., Gomes A. L., de Almeida V. A., Rodrigues C. V., Pereyra A., Wisniewski J., Bjorkman K., Bjorkman J., Meade M., Babler B. L. (2008). The magnetic field structure of the Small Magellanic Cloud. *Proc. IAU*, **4**, S256, 178–183. DOI: 10.1017/S1743921308028421
28. Maharana S., Kyriotakis J. A., Ramaprakash A. N., Rajarshi C., Anche R. M., Shrish Shrish, Blinov D., Eriksen H. K., Ghosh T., Gjerlow E., Mandarakas N., Panopoulou G. V., Pavlidou V., Pearson T. J., Pelgrims V., Potter S. B., Readhead A. C. S., Skalidis R., Tassis K., Wehus I. K. (2021). WALOP-South: A Four Camera One Shot Imaging Polarimeter for PASIPHAE Survey. Paper I. Optical Design. *J. Astron. Telesc., Instrum., and Systems*, **7**(1), 014004. DOI: 10.1117/1.JA-TIS.7.1.014004.
29. Martínez-Solauche G., Karakci A., Delabrouille J. (2018). A 3D model of polarized dust emission in the Milky Way. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **476**, 1310–1330. DOI: 10.1093/mnras/sty204
30. Martins J. V. (2018). *The Hyperangular Imaging Polarimeter (HARP) and the Use of Nanosatellites for Earth Science Remote Sensing*. URL: http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa/uploads/Site/JournalClub/Vanderlei_11jul2018.pdf (Last accessed: 23.02.2024).
31. McKee C., Ostriker E. (2007). Theory of Star Formation. *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*, **45**, 565–687. DOI: 10.1146/annurev.astro.45.051806.110602.
32. Milinevsky G., Oberemok Y., Syniavskiy I., Bovchaliuk A., Kolomiets I., Fesianov I., Wang Y. (2019). Calibration model of polarimeters on board the Aerosol-UA space mission. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, **229**(5), 92–105. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.03.007
33. Minami Y. (2020). Determination of miscalibrated polarization angles from observed cosmic microwave background and foreground EB power spectra: Application to partial-sky observation. *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **6**, 063E01. DOI: 10.1093/ptep/ptaa057
34. Minami Y., Komatsu E. (2020). New Extraction of the Cosmic Birefringence from the Planck 2018 Polarization Data. *Phys. Rev. Lett.*, **125**, 221301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.221301.
35. Minami Y., Ochi H., Ichiki K., Katayama N., Komatsu E., Matsumura T. (2019). Simultaneous determination of the cosmic birefringence and miscalibrated polarization angles from CMB experiments. *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2019**(8), 083E02. DOI: 10.1093/ptep/ptz079.
36. Mudge J., Virgen M., Dean P. (2009). Near-infrared simultaneous Stokes imaging polarimeter. *Proc. SPIE*, **7461**, 74610L-1–74610L-6. DOI: 10.1117/12.828437
37. Mu T., Bao D., Han F., Sun Y., Chen Z., Tang Q., Zhang C. (2019). Optimized design, calibration, and validation of an achromatic snapshot full-Stokes imaging polarimeter. *Opt. Express*, **27**(16), 23009–23028. DOI: 10.1364/OE.27.023009.
38. Mu T., Zhang C., Liang R. (2015). Demonstration of a snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeter using Wollaston prism array. *J. Opt.*, **17**(12), 125708. DOI: 10.1088/2040-8978/17/12/125708
39. Mu T., Zhang C., Li Q., Liang R. (2015). Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters. *Opt. Express*, **23**(8), 10822–10835. DOI: 10.1364/OE.23.010822.

40. Oliva E. (1997). Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, **123**(3), 589–592. DOI: 10.1051/aas:1997175.
41. Pedersini F., Sarti A., Tubaro S. (1999). Accurate and simple geometric calibration of multi-camera Systems. *Signal Proc.*, **77**(3), 309–334. DOI: 10.1016/S0165-1684(99)00042-0
42. Pernechele C., Abe L., Bendjoya P., Cellino A., Massone G., Rivet J. P., Tanga P. (2012). A “single-shot” optical linear polarimeter for asteroids studies. *Proc. SPIE*, **8446**, 84462H-1-6. DOI: 10.1117/12.925933
43. Perreault J. D. (2013). Triple Wollaston-prism complete-Stokes imaging polarimeter. *Opt. Lett.*, **38**(19), 3874–3877. DOI: 10.1364/OL.38.003874.
44. Pezzaniti J. L., Chenault D., Roche M., Reinhardt J., Pezzaniti J. P., Schultz H. (2008). Four camera complete Stokes imaging polarimeter. *Proc. SPIE.*, **6972**, 69720J-1b–69720J-12. DOI: 10.1117/12.784797.
45. Piran T. (1999). Gamma ray bursts and the fireball model. *Phys. Rep.*, **314**(6), 575–667. DOI: 10.1016/S0370-1573(98)00127-6.
46. Radecke H. D., Kanbach G. (1992). The Egret High Energy Gamma Ray Telescope on GRO: Instrument Description and Scientific Mission. *Data Analysis in Astronomy IV*. Ed. V. Di. Gesu et al., 303–310. DOI: 10.1007/978-1-4615-3388-7_31.
47. Ramaprakash A. N., Rajarshi C. V., Das H. K., Khodade P., Modi D., Panopoulou G., Maharana S., Blinov D., Angelakis E., Casadio C., Fuhrmann L., Hovatta T., Kiehlmann S., King O. G., Kylafis N., Kougentakis A., Kus A., Mahabal A., Marecki A., Myserlis I., Paterakis G., Paleologou E., Lioudakis I., Papadakis I., Papamastorakis I., Pavlidou V., Pazderski E., Pearson T. J., Readhead A. C. S., Reig P., Slowikowska A., Tassis K., Zensus J. A. (2019). RoboPol: A four-channel optical imaging polarimeter. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **485**, 2355–2366. DOI: 10.1093/mnras/stz557.
48. Romero G. (2005). Proc. Marcel Grossmann 10th Meeting, World Scientific Publishing (Singapore), P. 2429.
49. Shestopalov D. I., Golubeva L. F. (2015). Polarimetric properties of asteroids. *Adv. Space Res.*, **56**, 2254–2274. DOI: 10.1016/j.asr.2015.08.013
50. Shibata S., Hagen N., Kawabata S., Otani Y. (2019). Compact and high-speed Stokes polarimeter using three-way polarization-preserving beam splitters. *Appl. Opt.*, **58**(21), 5644–5649. DOI: 10.1364/AO.58.005644
51. Shrestha M., Steele I. A., Piascik A. S., Jermak H., Smith R. J., Copperwheat C. M. (2020). Characterization of a dual-beam, dual-camera optical imaging polarimeter. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **494**, 4676–4686. DOI: 10.1093/mnras/staa1049
52. Shu F., Adams F., Lizano S. (1987). Star Formation in Molecular Clouds: Observation and Theory. *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*, **25**, 23–81. DOI: 10.1146/annurev.aa.25.090187.000323
53. Sillanpää A., Takalo L. O., Nilsson K., Kikuchi S. (1993). Photopolarimetry of BL Lac. *Astrophys. Space Sci.*, **206**, 55–70. DOI: 10.1007/BF00658383.
54. Sinyavskii I. I., Ivanov Yu. S., Vid'machenko A. P. (2013). Concept of the construction of the optical setup of a panoramic Stokes polarimeter for small telescopes. *J. Opt. Technol.*, **80**(9), 545–548. DOI: 10.1364/JOT.80.000545.
55. Steele I. A., Mundell C. G., Smith R. J., Kobayashi S., Guidorzi C. (2009). Ten percent polarized optical emission from GRB-090102. *Nature*, **462**, 767–769. DOI: 10.1038/nature08590
56. Svalheim T. L., Andersen K. J., Aurlen R., Banerji R., Bersanelli M., Bertocco S., Brilenkov M., Carbone M., Colombo L. P. L., Eriksen H. K., Foss M. K., Franceschet C., Fuskeland U., Galeotta S., Galloway M., Gerakakis S., Gjerløw E., Hensley B., Herman D., Iacobellis M., Ieronymaki M., Ihle H. T., Jewell J. B., Karakci A., Keihänen E., Keskitalo R., Maggio G., Maino D., Maris M., Paradiso S., Partridge B., Reinecke M., Suur-Uski A.-S., Tavagnacco D., Thommesen H., Watts D. J., Wehus I. K., Zacchei A. (2023). Beyond Planck. XIV. Polarized foreground emission between 30 and 70 GHz. *Astron. and Astrophys.*, **675**, A14. DOI: 10.1051/0004-6361/202243160.
57. Snyiavskiy I., Ivanov Yu. S. (2014). Four-channel imaging Stokes polarimeter for small telescopes. *Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso*, **43**, 253–255.
58. Snyiavskiy I. I., Ivanov Yu. S., Sosonkin M. G., Milinevsky G. P., Koshman G. (2018). Multispectral imager-polarimeter of the “AEROSOL-UA” space project. *Space Sci. and Technol.*, **24**(3), 23–32. DOI: 10.15407/knit2018.03.023.
59. Snyiavskiy I., Oberemok Ye., Danylevsky V., Bovchaliuk A., Fesianov I., Milinevsky G., Savenkov S., Yukhymchuk Yu., Sosonkin M., Ivanov Yu. (2021). Aerosol-UA satellite mission for the polarimetric study of aerosols in the atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, **267**, 107601. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107601
60. Tedesco E. F. (1994). Asteroid albedos and diameters. *Asteroids, comets, meteors 1993*: Proc. 160th Int. Astron. Union (Belgirate, Italy, June 14–18, 1993). Eds A. Milani, M. Di Martino, and A. Cellino. *Int. Astron. Union. Symp.*, No. 160, 55–74.
61. Toth L. V., Doi Y., Zahorecz S., Pinter S., Racz I. I., Bagoly Z., Balazs L.G., Horvath I., Kiss C., Kovács T., Onishi T. (2019). Galactic foreground of gamma-ray bursts from AKARI Far-Infrared Surveyor. *Publ. Astron. Soc. Jap.*, **71**(1), 10 (1–20). DOI: 10.1093/pasj/psy123.
62. Tyo J., S., Goldstein D., L., Chenault D. B., Shaw J. A. (2006). Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications. *Appl. Opt.*, **45**(22), 5453–5469. DOI: 10.1364/AO.45.005453.

63. Zhang H. (2019). Blazar optical polarimetry: Current progress in observations and theories. *Galaxies*, 7(4), 85. DOI: 10.3390/galaxies7040085.
64. Zhang Z. (2020). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22, 1330—1334. DOI: 10.1109/34.888718.
65. Zhu S., Jin S., Shu Y., Liu Z., Hong J. (2023) Polarization calibration method for simultaneous imaging polarization camera. *Proc. SPIE.*, 125570D. DOI: 10.1117/12.2646131

Стаття надійшла до редакції 02.02.2024

Після доопрацювання 18.03.2024

Прийнято до друку 18.03.2024

Received 02.02.2024

Revised 18.03.2024

Accepted 18.03.2024

*I. I. Синявський*¹, зав. відділу, канд. техн. наук, старш. дослідник

*A. Кастро-Тірадо*², професор, PhD

*Ю. С. Іванов*¹, старш. наук. співроб.

С. С. Гузій^{2,3}, наук. співроб.², доцент³, канд. фіз.-мат. наук

Є. А. Оберемок^{1,4}, наук. співроб.¹, доцент⁴, канд. фіз.-мат. наук

¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

² Інститут астрофізики Андалусії
Glorieta de la Astronomía s/n, 18008, Гранада, Іспанія

³ Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
вул. 68 Десантників 10, Миколаїв, Україна, 54000

⁴ Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська 60, Київ, Україна, 01033

ШИРОКОКУТНИЙ СТОКС-ПОЛЯРИМЕТР ДЛЯ МЕРЕЖІ ТЕЛЕСКОПІВ BOOTES. ОПТИЧНИЙ ТА МЕХАНІЧНИЙ ДИЗАЙН

Розглянуто зображувальний поляриметр EDIPO (Efficient & Dedicated wide-field Imaging Polarimeter), який у комбінації з астрономічними телескопами мережі BOOTES (Burst Observer and Optical Transient Exploring System) призначений для дослідження поляризаційних особливостей швидкоплинних процесів післясвітіння гамма-спалахів (Gamma-ray burst — GRB). Конструкція поляриметра дозволяє встановлювати його на телескопи мережі з діаметром головного дзеркала до 1.4 м. Поляриметр спроектовано для проведення аналізу параметрів поляризації повністю та частково лінійно поляризованого випромінювання у спектральному діапазоні 450 — 1000 нм. Аналізатор поляризації не містить рухомих елементів і дозволяє проводити вимірювання параметрів Стокса I , Q , U випромінювання у полі зору $30' \times 30'$ одномоментно для однієї спектральної смуги робочого спектрального діапазону. Оптичну частину поляриметра без спектральних фільтрів та аналізатора поляризації виготовлено, зібрано та випробувано на телескопі з діаметром дзеркала 1.23 м. Розглянуто можливі підходи до поляриметричного калібрування системи поляриметр — телескоп.

Ключові слова: поляризація, Стокс-поляриметр, телескоп.