

Ұ Л Т Т Ы Қ
М Е М Л Е К Е Т Т І К
Ғ Ы Л Ы М И - Т Е Х Н И К А Л Ы Қ
С А Р А П Т А М А О Р Т А Л Ы Ғ Ы

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ГОСУДАРСТВЕННОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
ЭКСПЕРТИЗЫ

ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫНЫҢ ЖАҢАЛЫҚТАРЫ

ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛ

НОВОСТИ НАУКИ КАЗАХСТАНА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



4
2025

Ұлттық мемлекеттік ғылыми-техникалық
сараптама орталығы

Национальный центр государственной
научно-технической экспертизы

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫНЫҢ
ЖАҢАЛЫҚТАРЫ**
ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛ

**НОВОСТИ НАУКИ
КАЗАХСТАНА**
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
№ 4 (167)

Алматы 2025

Межотраслевой научно-технический журнал «Новости науки Казахстана» (ISSN:1560-5655) издаётся с 1989 г. и выходит 4 раза в год. В журнале публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, обзорные работы отечественных и зарубежных авторов. Язык публикаций: казахский, русский, английский.

Область публикаций: Биотехнологии и Химические технологии; Пищевая и перерабатывающая промышленность; Естественные науки, инжиниринг и технологии; Социально-гуманитарные науки.

Предназначен для профессорского-преподавательского состава Вузов, докторов PhD, магистрантов, студентов и сотрудников научно-исследовательских институтов, предприятий и организаций, а также работников министерств и ведомств.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Болегенова С.А., доктор физико-математических наук, профессор
(главный редактор)

Гребцова Л.Н. (редактор)

Сухова Е.С. (ответственный секретарь)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Велямов М.Т., доктор биологических наук, профессор, академик Академии
сельскохозяйственных наук РК,

Акимбеков Н.Ш., PhD, профессор;

Тастамбек Қ.Т., доктор PhD;

Тасибеков Х.С., кандидат химических наук, асс. профессор;

Ханиев Б.А., доктор PhD;

Кистаубаева А.С., кандидат биологических наук, асс. профессор;

Акимбекова Г.У., доктор экономических наук, профессор, академик НААН;

Тауанов Ж.Т., доктор PhD, асс. профессор;

Абдиева Г.Ж., кандидат биологических наук, асс.профессор (доцент);

Тайпакова С.М., доктор философии (PhD), асс.профессор (доцент);

Джурупова Б.К., кандидат технических наук, профессор, (Кыргызстан);

Руткуниене Ж., доктор PhD, профессор, (Литва);

Славинская Н., доктор PhD, профессор (Германия);

Дигель И.Э., доктор PhD, профессор (Германия);

Джиан Джа, доктор PhD, профессор (Китай);

Рахматуллаев М.А., доктор технических наук, профессор, (Узбекистан).

Республика Казахстан, 050026, г. Алматы,

ул. Богенбай батыра, оф. 218

Тел/факс: +8 727 222-1102 (вн. 141), +7 727 378-0549

e-mail: l.grebtsova@ncste.kz, y.sukhova@ncste.kz

Веб-сайт: vestnik.nauka.kz

СОДЕРЖАНИЕ

БИОТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Зайнитдинова Л.И., Лазутин Н.А., Жураева Р.Н., Хегай Т.Б., Эргашев Р.Б.</i> Создание коллекции представительных культур микроорганизмов биотопов г. Ташкента на базе обследования влияния антропогенной нагрузки на микробиом городской среды (на английском языке & перевод)	6
---	---

ПИЩЕВАЯ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Иштаев А.И., Якияева М.А., Жакатаева А.Н.</i> Исследование сохраняемости сахарной свеклы при озонной и ионоозонной обработке (на английском языке & перевод)	30
<i>Мирзаева Ш.У., Халилов И.М., Мухамадиев Б.Т., Халилова Ф.М., Жалолов Э.Б.</i> Внеклеточные пептиды мутантов – фидеров хлореллы (на английском языке & перевод)	66

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ, ИНЖИНИРИНГ И ТЕХНОЛОГИИ

<i>Юров В.М., Жангозин К.Н., Каргин Д.Б.</i> Механизм трения графита и графена (на английском языке & перевод).....	82
<i>Мусахан Н.П., Курбанбеков Ш.Р., Балтабаева Д.Э., Камбарбеков С.Х.</i> Исследование физико-механической и морфологической стабильности покрытий ZRCN для стали 65Г (на казахском языке)	130
<i>Алтай Е.А., Абляш Г., Федоров А.В.</i> Одночастотный фильтр для обработки сигналов (на английском языке)..	142

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

<i>Жидекулова Г.Е., Бекболатов С.Б., Аман А., Жоранова Н.</i> Использование специализированных цифровых устройств в учебном процессе (на казахском языке)	155
<i>Акын Б.К., Абдуразакова К.Ю.</i> История возникновения и развития ислама в Японии (на английском языке).....	165
ШАБЛОН НАПИСАНИЯ СТАТЬИ	178

МАЗМҰНЫ

БИОТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖӘНЕ ХИМИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

<i>Зайнитдинова Л.И., Лазутин Н.А., Жураева Р.Н., Хөгай Т.Б., Эргашев Р.Б.</i> Қала ортасының микробиомасына антропогендік жүктеменің өсерін зерттеу негізінде Ташкент қаласының биотоптары микроорганизмдерінің репрезентативті дақылдарының топтамасын құру (ағылшын тілінде & аударма).....	6
--	---

ТАМАҚ ЖӘНЕ ӨңДЕУ Өнеркәсібі

<i>Изтаев А.И., Якияева М.А., Жакатаева А.Н.</i> Қант қызылшасының озонмен және ионозонмен өңдеу кезінде сақтау мерзімін зерттеу (ағылшын тілінде & аударма).....	30
<i>Мирзаева Ш.У., Халилов И.М., Мухамадиев Б.Т., Халилова Ф.М., Жалолов Э.Б.</i> Хлорелланы қорытқан мутанттардың жасушыдан тыс пептидтері (ағылшын тілінде & аударма)	66

ЖАРАТЫЛЫСТАНУ ҒЫЛЫМДАРЫ, ИНЖИНИРИНГ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

<i>Юров В.М., Жанғозин К.Н., Каргин Д.Б.</i> Графит мен графендің үйкеу механизмі (ағылшын тілінде & аударма).....	82
<i>Мұсахан Н.П., Курбанбеков Ш.Р., Балтабаева Д.Э., Камбарбеков С.Х.</i> 65Г болатына арналған ZRCN жабындарының физика-механикалық және морфологиялық тұрақтылығын зерттеу	130
<i>Алтай Е.А., Әблеш Ф., Федоров А.В.</i> Сигналдарды өңдеуге арналған бір жиілікті сүзгі (ағылшын тілінде).....	142

ӘЛЕУМЕТТІК-ГУМАНИТАРЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР

<i>Жидекұлова Г.Е., Бекболатов С.Б., Аман А., Жоранова Н.</i> Мамандандырылған сандық құрылғыларды оқу процесінде қолдану	155
<i>Ақын Б.Қ., Абдуразакова К.Ю.</i> Жапониядағы исламның пайда болуы және даму тарихы (ағылшын тілінде).....	165
МАҚАЛА ЖАЗУ ҮЛГІСІ	178

CONTENT

BIOTECHNOLOGY AND CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Zainitdinova L.I., Lazutin N.A., Zhuraeva R.N., Kheday T.B., Ergashev R.B.</i> Creation of a collection of representative cultures of microorganisms of Tashkent biotopes based on a survey of the influence of anthropogenic load on the microbiome of the urban environment	6
---	---

FOOD AND PROCESSING INDUSTRY

<i>Iztaev A.I., Yakiyayeva M.A., Zhakatayeva A.N.</i> Study of the shelf life of sugar beet under ozone and ion ozone treatment	30
<i>Mirzaeva Sh.U., Khalilov I.M., Mukhamadiev B.T., Khalilova F.M., Jalolov E.B.</i> Extracellular peptides of mutants – chlorella feeders	66

NATURAL SCIENCES, ENGINEERING AND TECHNOLOGY

<i>Yurov V.M., Zhangozin K.N., Kargin D.B.</i> Friction mechanism of graphite and graphene	82
<i>Musakhan N.P., Kurbanbekov Sh.R., Baltabaeva D.E., Kambarbekov S.Kh.</i> Study of physical-mechanical and morphological stability of ZRCN coatings for 65G steel (in Kazakh)	130
<i>Altay Y.A., Ablesh G., Fedorov A.V.</i> Single-frequency filter for signal processing	142

SOCIAL AND HUMANITARIAN

<i>Zhidekulova G.E., Bekbolatov S.B., Aman A., Zhoranova N.</i> Use of specialized digital devices in the learning process (in Kazakh)	155
<i>Akyn B.K., Abdurazakova K. Yu.</i> The history of the emergence and development of islam in Japan	165
ARTICLE WRITING TEMPLATE	178

БИОТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

МФТИ 34.27.23

https://doi.org/10.53939/1560-5655_2025_4_6

**Zaynitdinova L.I.¹, Lazutin N.A.¹, Juraeva R.N.¹, Khegay T.B.¹,
Ergashev R.B.¹**

¹Institute of Microbiology, Academy of Sciences of the Republic of
Uzbekistan, Tashkent c., Uzbekistan

CREATION OF A COLLECTION OF REPRESENTATIVE CULTURES OF MICROORGANISMS OF TASHKENT BIOTOPES BASED ON A SURVEY OF THE INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC LOAD ON THE MICROBIOME OF THE URBAN ENVIRONMENT

Abstract. A microbiological survey of the snow cover in Tashkent was conducted. The chemical and microbiological parameters of samples with varying degrees of contamination were determined. It was demonstrated that contaminated samples exhibited higher microbial colonization compared to uncontaminated ones. The microbiological examination of the Chirchik River basin in Tashkent and the Tashkent region revealed the presence of a total number of microorganisms reaching up to 6.0×10^3 , including up to 1.0×10^2 coliform bacteria. The microbiological analysis of soil samples from roadside areas and recreational zones in Tashkent indicated a diversity of identified microbiocenoses, which significantly influence their activity and development in the context of impending urbanization. The microbiological survey highlighted changes in the qualitative composition of soil microbiocenoses in the city, particularly those located at short distances from transport systems. The most representative cultures from the roadside and recreational zones of Tashkent have been identified and characterized, along with their physiological and biochemical indicators. These microorganisms have been classified down to the species level based on morphological features and certain physiological-biochemical characteristics, with confirmation provided through Maldi Tof analysis. A collection has been established comprising the most representative strains of microorganisms from various ecosystems in Tashkent and the Tashkent region, which includes 23 strains of bacteria, 2 strains of actinomycetes, and 3 strains of microscopic fungi, all possessing significant industrial value. This collection may serve as a valuable resource for the study and further utilization of these microorganisms.

Keywords: biodiversity, bacterial community, temperature, urban river network, urban soils, snow cover microbiome, anthropogenic impact.

Introduction. Urban soil represents a unique ecosystem in which various microorganisms, including bacteria, fungi, and archaea, interact. Research indicates that urban conditions can significantly influence the structure of microbial communities, their functions, and biodiversity. Anthropogenic factors, such as pollution, urban development, and waste management systems, have a profound impact on microbial species. For instance, studies demonstrate that intense pollution can lead to a

reduction in species diversity and alterations in community structure [1]. In urban soil fulfill crucial roles, such as the decomposition of organic matter and the maintenance of nutrient cycling. Their diversity is linked to soil health and the resilience of the urban ecosystem. Investigating microorganisms in urban environments contributes to the development of strategies for ecosystem restoration and enhancing resilience in the face of global changes [2].

Urban rivers are typically subject to significant pollution, which impacts the biodiversity of microorganisms. Hydrological changes and anthropogenic factors, such as wastewater and precipitation, lead to alterations in the composition of microorganisms within these rivers. For instance, studies indicate that pollution may result in the dominance of pathogenic microorganisms [3]. The functional structure of microbial communities in rivers is determined by the availability of resources and the level of pollution. Certain groups of microorganisms may exhibit heightened sensitivity to environmental changes, reflecting the overall state of the ecosystem [4]. Microorganisms in rivers play a critical role in processes such as biodegradation, transformation of organic matter, and nutrient assimilation. These processes are vital for maintaining the health of ecosystems [5].

Uzbekistan is currently undergoing a rapid process of urbanization. In this context, significant attention should be devoted to the study of urban biodiversity, as the investigation of the above-ground biodiversity of cities will provide individuals with a foundation for understanding the impact of urbanization on biodiversity. On one hand, the study of urban biodiversity plays a positive role in understanding and conserving biodiversity; on the other hand, it provides a theoretical basis for the development of urban ecology. Urbanization is one of the primary causes of biodiversity loss and homogenization; however, due to the functional diversity of microorganisms and the complexity of the urban environment, the influence of urbanization on the microbial diversity of various ecological niches requires detailed research.

The study of the spatial distribution and characteristics of bacteria that are resilient to changing urban environmental conditions in urban soils allows for an investigation into the role of soil microbial diversity in the enhancement of urban areas and the maintenance of urban soil. Furthermore, it serves as a valuable resource for the isolation and characterization of microorganisms with unique properties. The research in this area will facilitate the establishment of a foundation for the future application of the microorganisms within the created collection as biopreparations for various needs. The abundance and diversity of the planet's inhabitants correspond to the variety of ecological niches in biogeocoenoses. Millions of biological species represent a fundamental resource and the basis for the resilience (homeostasis) of the biosphere. The species diversity of microorganisms is a primary characteristic of the structure and properties of ecosystems.

The conservation of biodiversity, including microbial biodiversity, is an urgent task of contemporary relevance. This is particularly pressing given that anthropogenic impacts on natural ecosystems have led to the extinction of numerous species and alterations in the structural indicators of microbial biocenoses, resulting in their further transformation. This process has accelerated catastrophically

in the 20th century, leading to a loss of resilience in individual ecosystems and in the biosphere as a whole. This underscores the importance of understanding and preserving the biodiversity of microorganisms within urban ecosystems.

Research Methods. The subjects of the study consisted of samples collected from various ecotopes in Tashkent, including soil, snow cover, rainwater, and the waters of the Chirchik River. Soil samples were collected in accordance with GOST 17.4.4.02-84 standards. The collection of water samples for microbiological analysis was conducted following GOST 31942-2012 standards. The study of soil samples was conducted to identify ecological-trophic groups of microorganisms (ETGMs), utilizing dilution methods on diagnostic culture media such as MPA, Chapek, Sabouraud, KAA; Ashby; Endo, and Giltay. The colonies that developed were subsequently subcultured onto appropriate media and then purified. The resulting pure cultures were identified using physiological-biochemical and morphological criteria [6]. The taxonomic identification at the genus level was performed according to the Bergey's manual of determinative bacteriology [1997]. The genus affiliation of micromycetes was determined based on morphological and cultural characteristics [7]. Species identification was carried out using the MALDI-TOF method and molecular-genetic analysis based on 16S rRNA sequencing.

Results. The snow cover, characterized by high sorptive capacity, appears to be the most informative object for detecting anthropogenic pollution not only in atmospheric precipitation but also in atmospheric air, as well as in the subsequent contamination of water and soil. Given the significance of urban ecological issues, this experimental study investigates the snow cover of Tashkent, with the aim of identifying its microbiological composition and the characteristics of chemical pollution against the backdrop of its ecological-geochemical condition. For the analyses, three zones of Tashkent were identified, each exhibiting different levels of anthropogenic impact:

Sidewalks – influenced by human activity,

Roadways, Untouched samples (pristine snow in a garden) (Table 1).

Table 1 - Microbiological Analysis and Characteristics of Snow Samples in Tashkent

#	Coordinates of the sampling location	snow t, °C	pH	MPa	Chapek	Endo	Sabouraud	KAA
1	41°19'27.38"-N 69°15'35.5"-E	-4,0	4,0	7,5 CFU/ mL	2,7×10 ¹	-	2 CFU/ mL	-
2	41°19'28.19"-N 69°15'33.35"-E	-9,0	4,0	3,3×10 ⁵	1,5×10 ⁵	8,5×10 ¹	5×10 ²	6,45×10 ²
3	41°19'21.4"-N 69°15'40.31"-E	-6,0	4,0	3,5 CFU/ mL	1,3×10 ¹	-	1 CFU/ mL	-

Analyzing the microbial composition of snow cover samples, it is important to note that the indicators exhibit significant variability. The results obtained indicate that the sampling location has a profound impact on both the qualitative and quantitative composition of the microbiota. The maximum diversity of microorganisms was observed in samples taken from the roadside, where their concentration reached up to 10^5 CFU/ml. In contrast, in cleaner locations, the concentration of microbial cells was considerably lower, not exceeding 10^1 - 10^2 CFU/ml (Table 1).

It is known that high anthropogenic load poses a potential threat to water quality and disrupts conditions for water use, increasing the risk of intestinal infections and intoxications among the population due to the influx of wastewater containing pathogenic microorganisms, pesticides, heavy metals, and other pollutants. The ecological situation in the Republic of Uzbekistan in recent years has emerged as a problem of regional and national significance, which is significantly reflected in the condition of natural water bodies in the city of Tashkent, particularly the Chirchik River – the primary watercourse of the city that serves as a source for domestic, drinking, and recreational water use for the population. The Chirchik River is classified as fresh surface flowing water. A substantial discharge of pollutants into the surrounding natural environment through wastewater is primarily attributed to the ineffective operation of wastewater treatment facilities, exacerbated by the overall ecological conditions. Samples were collected along the course of the Chirchik River as it flows through Tashkent: Sample 1 (the channel bed of the Anhor Canal, near the Monument to Courage); Sample 2 (the bed of the Chirchik River, in the industrial zone of Sergeli); Sample 3 (the bed of the Chirchik River, at the Gazalkent hydro junction); Sample 4 (the pond in the Chirchik Forestry). According to the results of the study on the water from the Chirchik River, microorganisms belonging to all examined groups were identified, except for sulfate-reducing bacteria (Table 2).

Table 2 - Microbiological Analysis of Water from the Chirchik River, Tashkent

#	Coordinates of the sampling location	t, °C	pH	MPa	Endo	MPB	Giltay	Chapek	Postgate
1	41°19'25.26"N 69°16'16.18"E	+14,0	6,0	$1,25 \times 10^4$	4,5 CFU/ mL	$2,5 \times 10^2$	$2,5 \times 10^2$	$0,5 \times 10^1$	-
2	41°11'09.87"N 69°14'56.12"E	+19,0	5,0	$1,16 \times 10^5$	$1,0 \times 10^2$	$6,0 \times 10^3$	$6,0 \times 10^1$	-	-
3	41°24'53.38"N 69°35'21.42"E	+17,0	6,0	$3,45 \times 10^3$	$4,0 \times 10^1$	$2,5 \times 10^2$	$6,0 \times 10^1$	1 CFU/ mL	-
4	41°22'36.33"N 69°31'29.26"E	+23,0	5,0	$6,15 \times 10^4$	-	$2,5 \times 10^3$	-	-	-

Analyzing the data obtained from the microbiological examination of soil samples in Tashkent, which have been subjected to varying degrees of anthropogenic impact, it has been revealed that the microbial communities in the investigated samples exhibit a number of distinct characteristics. Compared to the soils in park areas (samples 3, 4, 5, 7), the roadside urban soils (samples 1, 2, 6) showed a reduced content of fungal mycelium, which are the primary soil-forming organisms responsible for the decomposition of organic matter (Table 3).

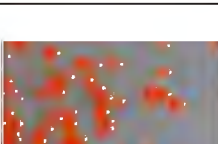
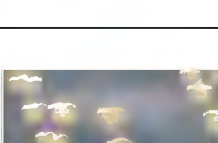
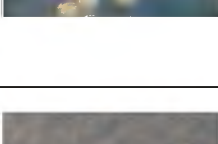
Table 3 - Microbiological Analysis of Soils in the Territory of Tashkent

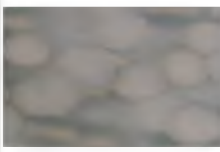
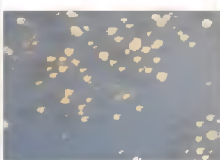
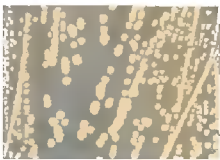
#	Coliform bacteria	Denitrifiers	Oligonitro-philic	Nitrifiers	Sulfate re-ducers	Saprophytes	MPA+ wort	Ammonifiers
1	-	$1,3 \times 10^3$	$3,9 \times 10^6$	$2,5 \times 10^3$	10^1	$5,9 \times 10^5$	-	10^1
2	10^1	$2,0 \times 10^4$	$3,1 \times 10^6$	-	$2,5 \times 10^1$	$1,35 \times 10^6$	$5,2 \times 10^4$	$2,5 \times 10^2$
3	-	$6,0 \times 10^2$	$6,1 \times 10^6$	$2,5 \times 10^3$	$2,5 \times 10^1$	$8,2 \times 10^5$	$3,2 \times 10^4$	$2,5 \times 10^3$
4	$6,0 \times 10^1$	$1,3 \times 10^4$	$8,1 \times 10^6$	-	$2,5 \times 10^1$	$1,22 \times 10^6$	$7,0 \times 10^4$	-
5	-	$2,5 \times 10^2$	$1,15 \times 10^6$	$2,5 \times 10^3$	10^1	$4,4 \times 10^5$	$3,2 \times 10^4$	$2,5 \times 10^2$
6	-	$6,0 \times 10^2$	$5,35 \times 10^6$	$2,5 \times 10^3$	-	$3,6 \times 10^6$	$3,6 \times 10^5$	$2,5 \times 10^3$
7	$1,5 \times 10^1$	$6,0 \times 10^1$	$3,75 \times 10^6$	-	10^1	$6,7 \times 10^5$	$1,8 \times 10^5$	$5,0 \times 10^3$

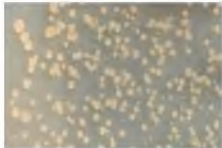
At the same time, the conditions for plant growth deteriorate. A decrease in cellulolytic microorganisms has been observed in roadside soils compared to soils in recreational areas, which possess a higher plant biomass, in accordance with the data provided by the authors [8-11]. As a result of the survey of the eco-niches in Tashkent, a collection of the most representative species of microorganisms has been established, which may serve as a valuable resource for the study and further utilization of the obtained strains (Table 4).

Table 4 - Brief Characteristics of Representative Microorganism Species in the Ecosystem of Tashkent City

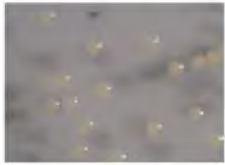
#	Strain Name	Location and Date of Isolation	Brief Description	Photo	Biotechnological Potential
1	Bacillus licheniformis	Tashkent c., soil, 2022	Gram-positive mesophilic bacterium, measuring 2-3 μm . The optimal growth temperature is +50°C.		One of the most significant bacteria in the production of industrial enzymes – alkaline serine protease and alpha-amylase.

2	Bacillus simplex	Tashkent c., soil, 2022	Gram-variable, motile, spore-forming rod-shaped bacterium, with a diameter of 0.7-0.9 μm . The optimal growth temperature is 25-37°		Possesses the potential to enhance crop yield and plant growth.
3	Bacillus cereus	Tashkent c., soil, 2022	Gram-positive motile spore-forming rod, measuring 1x3-4 μm . Chemoorganotrophic. The optimal temperature is 30-32°C.		Indicator test organism for the food industry.
4	Pantoea agglomerans	Tashkent c., soil, 2022	Gram-negative motile aerobic bacterium, measuring 0.5-1x1-3 μm . The optimal growth temperature is 28-30°C.		Competitor of phytopathogens, antibiotic producer; certain products may serve as preservatives.
5	Serratia marcescens	Tashkent c., soil, 2022	Straight, motile (peritrichous) Gram-negative rods measuring 0.9-2.0 by 0.5-0.8 μm . The optimal growth temperature ranges from 25 to 30°C.		Exhibits antimicrobial properties due to the pigment prodigiosin.
6	Listeria grayi	Tashkent c., soil, 2022	Gram-positive, non-spore-forming, non-hemolytic, facultatively anaerobic, motile bacteria measuring 0.4-0.5 by 0.5-2.0 μm . The temperature range for growth is from +3 to +45°C.		Not considered a pathogen for humans and animals.
7	Stenotrophomonas maltophilia	Tashkent c., soil, 2022	Motile, Gram-negative rod-shaped bacteria measuring 0.4-0.7 by 0.7-1.8 μm . The optimal growth temperature is between 32 and 35°C.		Acts as a growth stimulator for tomatoes under salt stress conditions.

8	<i>Achromobacter piechaudii</i>	Tashkent c., soil, 2022	Rod-shaped, motile, aerobic Gram-negative bacteria measuring 0.8–1.2 by 2.5–3.0 μm . The optimal growth temperature is between 30 and 35°C.		Promotes plant growth through the production of indole-3-acetic acid (IAA) and ACC deaminase.
9	<i>Bacillus mycoides</i>	Tashkent c., soil, 2022	Gram-positive, non-motile rods measuring 1.0–1.2 by 3.0–5.0 μm . The temperature range for growth is from +10 to +40°C.		Considered as an active ingredient in plant protection products.
10	<i>Pseudomonas putida</i>	Tashkent c., soil, 2022	Gram-negative motile rods, occurring in pairs, measuring 0.2–0.6 μm , aerobic, capable of producing the pigment pyoverdine. The optimal growth temperature ranges from 28 to 30°C.		Can be utilized as a biodestructor of oil and polystyrene.
11	<i>Pseudomonas trivialis</i>	Tashkent c., soil, 2022	A fluorescent gram-negative mesophilic motile bacterium, with dimensions of 0.8 x 1.6–3.3 μm . The optimal growth temperature is between 28 and 37°C.		Acts as a plant growth stimulant.
12	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	Tashkent c., soil, 2022	A gram-negative non-spore-forming rod-shaped bacterium, typically measuring 1–3 μm in length and 0.5–0.8 μm in width. The optimal growth temperature is between 30 and 32°C.		Capable of reducing metals and degrading hydrocarbons.
13	<i>Bacillus</i> sp. [4] CICC 23999-CICC	Tashkent c., snow cover, 2023	Straight rods with rounded ends, weakly motile, measuring 1–1.23–10 μm , occurring in chains of 1-2, with chains extending up to 7. Gram-positive		Grows well at 45°C. Capable of producing thermostable esterase.

14	<i>Bacillus muralis</i>	Tashkent c., snow cover, 2023	The organism is characterized by straight rods measuring 0.7-0.8 μm in diameter. It is gram-variable, with motile single cells and non-motile cells when arranged in chains. The endospores are ellipsoidal in shape and are positioned centrally or paracentrally. The optimal growth temperature ranges from +20 to +30°C.		This organism exhibits resistance to 15% NaCl concentration and is an indole producer.
15	<i>Psychrobacter immobilis</i>	Tashkent c., snow cover, 2023	This is a non-motile gram-negative coccobacillus, measuring 0.4-1.8 by 0.4-1.6 μm . The temperature range for growth spans from -10 to +42°C.		It is known to produce lipase and esterase.
16	<i>Bacillus pumilus</i>	Tashkent c., rainwater, 2023	The organism consists of small straight rods (approximately 0.7 μm) with rounded ends, typically found alone or in pairs, and less frequently in chains. Spore formation occurs according to the bacillary type. It is gram-positive, with an optimal growth temperature of +37°C.		This organism produces gibberellins and indole-3-acetic acid (IAA) and is capable of phosphate solubilization.

17	<i>Pseudomonas chlororaphis</i>	Tashkent Region, mountain river water, 2023	This organism features motile rods with polar flagella, measuring 1-1.5 by 1.5-2.5 μm , exhibiting greenish fluorescence. The optimal growth temperature is +28°C.		It is known to produce antibiotics and serves as a biodestructor of organic compounds, making it suitable for phytoremediation of soils.
18	<i>Staphylococcus hominis</i>	Tashkent Region, mountain river water, 2023	Gram-positive cocci, typically measuring between 1.2 to 1.4 μm in diameter. The optimal temperature for growth ranges from 30 to 37°C.		They may cause infections in patients with compromised immune systems.
19	<i>Bacillus subtilis</i>	Tashkent Region, mountain soil, 2023	A species of gram-positive spore-forming aerobic bacteria, measuring 0.7x2-8 μm . The temperature range for growth is from 5°C to 45°C.		It can act as an antagonist to pathogens and is capable of producing antibiotics, amino acids, vitamins, and other substances.
20	<i>Acinetobacter johnsonii</i>	Tashkent Region, Chirchik River water, 2023	Gram-negative short, plump rods measuring 1.0-1.5x1.5-2.5 μm . The optimal temperature for growth is between 33 to 35°C.		It can be utilized for the degradation of pesticides.
21	<i>Pseudomonas putida</i>	Tashkent Region, Chirchik River water, 2023	Gram-negative motile non-spore-forming single rods measuring 0.2-0.3x0.5-0.8 μm . The optimal temperature for growth is 30°C.		It is applied in bioremediation and as a biodegrader of petroleum products.

22	Lactobacillus murinus	Tashkent Region, Chirchik River water, 2023	Gram-positive, non-motile rods that often form chains, measuring 0.8-1.0 x 2.0-4.0 μm . The optimal temperature for growth is +30°C.		A broad-spectrum probiotic.
23	Acinetobacter bohemicus	Tashkent Region, Chirchik River water, 2023	Gram-negative, strictly aerobic, non-motile coccobacilli, measuring 1.0-1.5 x 1.5-2.5 μm . The optimal temperature for growth is +25-32°C.		They may be responsible for various infectious processes.
24	Trichoderma afroharzianum	Tashkent c., soil, 2022	Colony color is green, with smooth colony edges; conidia are subglobose to ovoid in shape, measuring 3.1-3.4 μm . The shape of the phialide ranges from lageniform to ampulliform, measuring 3.9-7.2 μm .		They play a key role in microbial communities and are utilized in various fields of agriculture and biotechnology.

Conclusion and Recommendations. Thus, the issue of maintaining and protecting microbial diversity within urban ecosystems presents significant challenges that require attention. These include: the impact of anthropogenic factors and ecological changes on the multifunctionality of the microbial ecosystem, the relationship between microbial diversity and human health, as well as the potential for utilizing the valuable properties of microorganisms for human needs. It is particularly noteworthy to emphasize the efforts directed towards isolating the most representative cultures, determining their biotechnological potential, and establishing a collection of the most representative species of microorganisms from various ecosystems in Tashkent and the Tashkent region. This collection comprises 23 strains of bacteria, 2 strains of actinomycetes, and 3 strains of microscopic fungi. All isolated microorganisms possess specific industrial significance, which can serve as a valuable resource for further study and eventual application of the obtained microorganisms.

Scope of Research Application. The collection of the most representative species of microorganisms, created as a result of the survey of various ecosystems in Tashkent, can serve as a valuable resource for studying and further utilizing the obtained strains across various sectors. It may also provide a significant source for the development of biopreparations with a broad spectrum of action.

Source of Research Funding. The research was conducted with funding from the state budget allocated to the Laboratory of Microbial Biodiversity at the Institute of Microbiology of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

References

- 1 McKinney M.L. Urbanization, Biodiversity, and Conservation. // *BioScience*, Volume 52, Issue 10, 2002, Pages 883–890, [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0883:UBAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2)
- 2 Gorovtsov A.V., Rajput V.D., Pulikova E., et al. Soil Microbial Communities in Urban Environment // Chapter In book: *Advances in Environmental Research*, Volume 76, Publisher: Nova Science USA, 2020.
- 3 Li X., Zheng H., Li M., Huang J., Sun J. Bacterial Community and Its Response to Environmental Factors in River Sediments from Downtown of Tianjin, China // *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 30, No. 5 (2021), 4059–4068 <https://doi.org/10.15244/pjoes/129691>
- 4 Zhang F., Zhang H., Yuan Y., Liu D., Zhu Ch., Zheng D., Li G., We Y. Different response of bacterial community to the changes of nutrients and pollutants in sediments from an urban river network // *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, Volume 14, article number 28, (2020) <https://doi.org/10.1007/s11783-019-1207-3>
- 5 Aboh A., Diversity M.: Values and Roles in Ecosystems // *Asian journal of biology*, 2020.
- 6 Netrusov A.I., Egorova M.A., Zaxarchuk L.M., Kolotilova N.N. *Praktikum po mikrobiologii. // Uchebnoe posobie dlya studentov vy'sshix uchebny'x zavedenij.* - M.: Akademiya, 2005. - 608 c.
- 7 Satton D., Fotergill A., Rinal'di M. *Opredelitel' patogenny'x i uslovno patogenny'x gribov: perevod s anglijskogo.* M.: Mir, 2001, 486 s.
- 8 Artamonova V.S. Osobennosti mikrobiologicheskix svojstv pochv urbanizirovanny'x territorij // *Sibirskij e'kologicheskij zhurnal.* – 2002. – T. 9. – №. 3. – S. 349-354.
- 9 Burdon F.J., Bai Y., Reyes M., Stamm Ch. Stream microbial communities and ecosystem functioning show complex responses to multiple stressors in wastewater // *Global Change Biology*, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.15302>
- 10 Monaco P., Baldoni A., Naclerio G., Bucci A. Impact of Plant-Microbe Interactions with a Focus on Poorly Investigated Urban Ecosystems-A Review // *Microorganisms*, 2024, 12(7):1276 <https://doi.org/10.3390/microorganisms12071276>
- 11 *Opredelitel' bakterij Berdzhii.* Izdanie v 2 t. s il. Pod red. Xoul't Dzh. Per. s angl. Zavarzin G.A., M.: «Mir», 1997, 799 s.

Зайнитдинова Л.И.¹, Лазутин Н.А.¹, Жураева Р.Н.¹, Хегай Т.Б.¹, Эргашев Р.Б.¹

¹Ўзбекистон Республикаси Ғылым академиясиның микробиология институты, Ташкент қ., Ўзбекистон

ҚАЛАЛЫҚ ОРТАНЫҢ МИКРОБИОМЫНА АНТРОПОГЕНДІК ЖҮКТЕМЕНІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ НЕГІЗІНДЕ ТАШКЕНТ ҚАЛАСЫ МИКРООРГАНИЗМ-ДЕРІНІҢ ТІРШІЛІК ОРТАСЫНЫҢ ТАНЫСТЫРМАЛЫ ДАҚЫЛДАРЫНЫҢ КОЛЛЕКЦИЯСЫН ЖАСАУ

Түйіндеме. Ташкент қаласында қар жамылғысына микробиологиялық тексеру жүргізілді. Ластану дәрежесі әртүрлі сынамалардың химиялық және микробиологиялық көрсеткіштері анықталды. Ластанған сынамалардың таза үлгілермен салыстырғанда микробтық тозандануы жоғары екендігі көрсетілген. Чирчик өзенінің арнасын, Ташкент қаласын және Ташкент облысын микробиологиялық зерттеу $6,0 \times 10^3$ дейін, оның ішінде $1,0 \times 10^2$ бгкп дейін *E. coli* тобының бактерияларының бар екенін көрсетті. Ташкент қала-

сының жол бойындағы аумақтары мен рекреациялық аймақтарының топырақ үлгілеріне жүргізілген микробиологиялық зерттеу нәтижесінде олардың белсенділігі мен дамып келе жатқан урбаногенездегі дамуын анықтайтын анықталған микробиоценоздардың алуан түрлілігі анықталды. Микробиологиялық зерттеу қала топырақтарының, әсіресе көлік жүйелерінен қысқа қашықтықта орналасқан микробиоценоздарының сапалық құрамының өзгеруін анықтады. Ташкент қаласының жол бойындағы және рекреациялық аймақтарының неғұрлым таныстырмалы дақылдары айқындалып, сипатталды және олардың физиологиялық-биохимиялық көрсеткіштері анықталды. Бұл микроорганизмдер морфологиялық және кейбір физиологиялық-биохимиялық белгілері бойынша түріне дейін анықталды және Maldi Tof талдауымен расталды. Ташкент қаласы мен Ташкент облысындағы әртүрлі эконіш микроорганизмдерінің ең танымал түрлерінің жинағы құрылды, оның ішінде бактериялардың 23 штаммы, актиномицеттердің 2 штаммы және микроскопиялық саңырауқұлақтардың 3 штаммы бар. Олар белгілі бір өндірістік құндылыққа ие, сондықтан алынған микроорганизмдерді зерттеу және одан әрі пайдалану үшін құнды дереккөз бола алады.

Түйін сөздер: биоәртүрлілік, бактериялық қауымдастық, температура, қалалық өзен желісі, қалалық топырақ, қар жамылғысының микробиомы, антропогендік әсер.

**Зайнитдинова Л.И.¹, Лазутин Н.А.¹, Жураева Р.Н.¹, Хегай Т.Б.¹,
Эргашев Р.Б.¹**

¹Институт микробиологии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

СОЗДАНИЕ КОЛЛЕКЦИИ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР МИКРООРГАНИЗМОВ БИОТОПОВ Г. ТАШКЕНТА НА БАЗЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА МИКРОБИОМ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Аннотация. Проведено микробиологическое обследование снежного покрова в г. Ташкент. Определены химические и микробиологические показатели проб с различной степенью загрязнений. Показано, что загрязненные пробы имеют большее микробное обсеменение, по сравнению с чистыми. Микробиологическое обследование русла р. Чирчик, г. Ташкент и Ташкентской области показало присутствие общего числа микроорганизмов в них до $6,0 \times 10^3$, в том числе до $1,0 \times 10^2$ БГКП. Проведенные микробиологическое обследование исследуемых образцов почвы придорожных территорий и рекреационных зон г. Ташкента показали разнообразие выявленных микробиоценозов, которые во многом определяют их активность и развитие в наступающем урбаногенезе. Микробиологическое обследование выявило изменение качественного состава микробиоценозов почв города, особенно расположенных на небольших расстояниях от транспортных систем. Выделены и охарактеризованы наиболее представительные культуры придорожных и рекреационных зон г. Ташкента и установлены их физиолого-биохимические показатели. Данные микроорганизмы определены до видовой принадлежности по морфологическим и некоторым физиолого-биохимическим признакам и подтверждены анализом Maldi Tof. Создана коллекция наиболее представительных видов микроорганизмов различных эконіш г. Ташкент и Ташкентской области, включающая 23 штамма бактерий, 2 штамма актиномицетов и 3 штамма микроскопических грибов, имеющих определённую промышленную ценность, которая может служить ценным источником для изучения и дальнейшего использования полученных микроорганизмов.

Ключевые слова: биоразнообразие, бактериальное сообщество, температура, городская речная сеть, городские почвы, микробиом снежного покрова, антропогенное воздействие.

Information about the authors

Zainitdinova Lyudmila Ibrakhimovna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Institute of Microbiology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent c., Uzbekistan, zajn-lyudmila@yandex.ru

Lazutin Nikolay Anatolyevich – Candidate of Biological Sciences, Institute of Microbiology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent c., Uzbekistan, nickolaz@bk.ru

Zhurayeva Rohila Nazarovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Institute of Microbiology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent c., Uzbekistan, roxila14@mail.ru

Khegay Tatyana Bronislavovna – employee, Institute of Microbiology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent c., Uzbekistan, tt75@bk.ru

Ergashev Rustambek Bakhtiyor ugli – employee, Institute of Microbiology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent c., Uzbekistan, rustambek_5889@mail.ru

Авторлар туралы маълумоттер

Зайнитдинова Людмила Ибрахимовна – биология ғылымдарының докторы, профессор, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының микробиология институты, Ташкент қ., Өзбекстан, zajnlyudmila@yandex.ru

Лазутин Николай Анатольевич – биология ғылымдарының кандидаты, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының микробиология институты, Ташкент қ., Өзбекстан, nickolaz@bk.ru

Жураева Рохила Назаровна – биология ғылымдарының кандидаты, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының микробиология институты, Ташкент қ., Өзбекстан, roxila-14@mail.ru

Хегай Татьяна Брониславовна – қызметкер, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының микробиология институты, Ташкент қ., Өзбекстан, tt75@bk.ru

Эргашев Рустамбек Бахтиер угли – қызметкер, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының микробиология институты, Ташкент қ., Өзбекстан, rustambek_5889@mail.ru

Сведения об авторах

Зайнитдинова Людмила Ибрахимовна – доктор биологических наук, профессор, Институт микробиологии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан, zajn-lyudmila@yandex.ru

Лазутин Николай Анатольевич – кандидат биологических наук, Институт микробиологии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан, nickolaz@bk.ru

Жураева Рохила Назаровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт микробиологии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан, roxila14@mail.ru

Хегай Татьяна Брониславовна – сотрудник, Институт микробиологии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан, tt75@bk.ru

Эргашев Рустамбек Бахтиер угли – сотрудник, Институт микробиологии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан, rustambek_5889@mail.ru

ПЕРЕВОД СТАТЬИ / МАҚАЛАНЫҢ АУДАРМАСЫ

**Зайнитдинова Л.И.¹, Лазутин Н.А.¹, Жураева Р.Н.¹, Хегай Т.Б.¹,
Эргашев Р.Б.¹**

¹Институт микробиологии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

СОЗДАНИЕ КОЛЛЕКЦИИ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР МИКРООРГАНИЗМОВ БИОТОПОВ Г. ТАШКЕНТА НА БАЗЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА МИКРОБИОМ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Аннотация. Проведено микробиологическое обследование снежного покрова в г. Ташкент. Определены химические и микробиологические показатели проб с различной степенью загрязнений. Показано, что загрязненные пробы имеют большее микробное обсеменение, по сравнению с чистыми. Микробиологическое обследование русла р. Чирчиқ, г. Ташкент и Ташкентской области показало присутствие общего числа микроорганизмов в них до $6,0 \times 10^3$, в том числе до $1,0 \times 10^2$ БГКП. Проведенное микробиологическое обследование исследуемых образцов почвы придорожных территорий и рекреационных зон г. Ташкента показали разнообразие выявленных микробиоценозов, которые во многом определяют их активность и развитие в наступающем урбанизме. Микробиологическое обследование выявило изменение качественного состава микробиоценозов почв города, особенно расположенных на небольших расстояниях от транспортных систем. Выделены и охарактеризованы наиболее представительные культуры придорожных и рекреационных зон г. Ташкента и установлены их физиолого-биохимические показатели. Данные микроорганизмы определены до видовой принадлежности по морфологическим и некоторым физиолого-биохимическим признакам и подтверждены анализом Maldi Tof. Создана коллекция наиболее представительных видов микроорганизмов различных экотипов г. Ташкент и Ташкентской области, включающая 23 штамма бактерий, 2 штамма актиномицетов и 3 штамма микроскопических грибов, имеющих определенную промышленную ценность, которая может служить ценным источником для изучения и дальнейшего использования полученных микроорганизмов.

Ключевые слова: биоразнообразие, бактериальное сообщество, температура, городская речная сеть, городские почвы, микробиом снежного покрова, антропогенное воздействие.

Введение. Городская почва является уникальной экосистемой, где происходит взаимодействие различных микроорганизмов, включая бактерии, грибы и археи. Исследования показывают, что городские условия могут значительно влиять на структуры микробных сообществ, их функции и биоразнообразие. Антропогенные факторы, такие как загрязнение, застройка и системы управления отходами, существенно влияют на виды микробов. Например, исследования показывают, что сильное загрязнение может приводить к уменьшению видового разнообразия и изменению структуры сообществ [1].

Микроорганизмы в городской почве выполняют важные функции, такие как разложение органических веществ и поддержание циклов питательных

веществ. Их разнообразие связано с состоянием почвы и устойчивостью городской экосистемы. Изучение микроорганизмов в городской среде помогает в разработке стратегий по восстановлению экосистем и повышению устойчивости в условиях глобальных изменений [2].

Городские реки, как правило, также подвержены значительному загрязнению, что оказывает влияние на биоразнообразие микроорганизмов. Гидрологические изменения и антропогенные факторы, такие как сточные воды и осадки, приводят к изменению состава микроорганизмов в реках. Например, исследования показывают, что загрязнение может приводить к доминированию патогенных микроорганизмов [3]. Функциональная структура микробных сообществ в реках определяется доступными ресурсами и уровнем загрязнения. Некоторые группы микроорганизмов могут быть более чувствительны к изменениям в среде, что отражает общее состояние экосистемы [4]. Микроорганизмы в реках играют критическую роль в процессах, таких как биоразложение, трансформация органических веществ и усвоение нутриентов. Эти процессы имеют большое значение для поддержания здоровья экосистем [5].

Узбекистан находится в процессе быстрой урбанизации. В связи с этим, изучению городского биоразнообразия должно уделяться большое внимание, а изучение наземного биоразнообразия городов даст людям основу для понимания воздействия урбанизации на биоразнообразие. Изучение городского биоразнообразия, с одной стороны, играет положительную роль в понимании и охране биоразнообразия, а с другой стороны, обеспечивает теоретическую основу для развития городской экологии. Урбанизация является одной из основных причин исчезновения и гомогенизации биоразнообразия, однако, в связи с функциональным многообразием микроорганизмов и сложностью городской среды, влияние урбанизации на микробное разнообразие различных эконис требует детальных исследований. Изучение пространственного распределения и характеристик устойчивых к изменяющимся условиям городской среды бактерий в городских почвах, позволяет изучить роль почвенного микробного разнообразия в благоустройстве населенных пунктов, и поддерживать городскую почву, а также является ценным источником для выделения и характеристики микроорганизмов, обладающих уникальными свойствами, изучение которых позволит создать базу для дальнейшего применения имеющихся в созданной коллекции микроорганизмов для использования в качестве биопрепаратов для различных нужд.

Многочисленность и разнообразие обитателей планеты соответствует разнообразию экологических ниш в биогеоценозах. Миллионы биологических видов – основной ресурс и базис устойчивости (гомеостаза) биосферы. Видовое разнообразие микроорганизмов является первой характеристикой структуры и свойств экосистем. Кроме этого, структурное разнообразие, характеризующее множество микроместообитаний и экологических ниш, и генетическое разнообразие внутри популяций являются важными показателями для формирования адаптационных возможностей экосистемы. Охрана биоразнообразия в том числе микробного биоразнообразия является

актуальнейшей задачей современности, так как в связи с техногенными воздействиями на природные экосистемы многие виды вымирают и сменяются структурные показатели микробного биоценоза, что ведет к его дальнейшему преобразованию. Этот процесс катастрофически ускорился в XX веке и ведет к потере устойчивости отдельных экосистем и биосферы в целом. Это подчеркивает важность понимания и охраны биоразнообразия микроорганизмов в городских экосистемах.

Методы исследований. Объектами исследований служили пробы, отобранные из различных экотопов г. Ташкент: почва, снежный покров, дождевые воды, воды реки Чирчик.

Отбор проб почв проводили согласно ГОСТ 17.4.4.02-84. Отбор проб водных образцов для микробиологического анализа проводили согласно ГОСТ 31942-2012.

Исследование почвенных образцов проводили на наличие эколого-трофических групп микроорганизмов (ЭКТГМ) и проводили методом разведений на диагностических питательных средах МПБ, Чапека, Сабуро, КАА, Эшби, Эндо, Гильтая. Выросшие колонии пересеивались на соответствующие среды, затем расчищались. Полученные чистые культуры идентифицировали с использованием физиолого-биохимических и морфологических показателей [6]. Родовую идентификацию проводили согласно определителю бактерий Берджи [1997]. Родовую принадлежность микромицетов определяли по морфологическим и культуральным признакам [7]. Видовую идентификацию проводили с использованием метода малди тоф и молекулярно-генетическим анализом на основе анализа 16S рРНК.

Результаты. Снежный покров, обладающий высокой сорбционной способностью, представляется наиболее информативным объектом при выявлении техногенного загрязнения не только атмосферных осадков, но и атмосферного воздуха, а также последующего загрязнения вод и почв. С учетом значимости экологических проблем городов, в данной экспериментальной работе изучен снежный покров г. Ташкент, с целью выявления его микробиологического состава и особенностей химического загрязнения на фоне его эколого-геохимического состояния. Для проведения анализов были определены 3 зоны г. Ташкента, имеющие различную степень антропогенной нагрузки:

1. тротуары – человеческий фактор,
2. автотрассы,
3. чистые пробы (нетронутый снег (в саду) (таблица 1).

Таблица 1- Микробиологический анализ и характеристика проб снега на территории г. Ташкент

№	Координаты места отбора проб	t снега, °C	pH	МПА	Чапека	Эндо	Сабуро	КАА
1	41°19'27.38"-N 69°15'35.5"-E	-4,0	4,0	7,5 КОЕ/ мл	2,7×10 ¹	-	2 КОЕ/ мл	-
2	41°19'28.19"-N 69°15'33.35"-E	-9,0	4,0	3,3×10 ⁵	1,5×10 ⁵	8,5×10 ¹	5×10 ²	6,45×10 ²
3	41°19'21.4"-N 69°15'40.31"-E	-6,0	4,0	3,5 КОЕ/ мл	1,3×10 ¹	-	1 КОЕ/ мл	-

Анализируя микробный состав проб снежного покрова, следует отметить, что показатели значительно варьируют. Полученные результаты свидетельствуют о том, что место отбора образцов сильно влияет на качественный и количественный состав микробиоты. Максимальное разнообразие микроорганизмов было выявлено в пробе с обочины проезжей части, их количество достигало до 10⁵ КОЕ/мл тогда как в более чистых локациях концентрация клеток микроорганизмов была значительно ниже и не превышало 10¹-10² КОЕ/мл (таблица 1).

Известно, что высокая антропогенная нагрузка обуславливает потенциальную опасность ухудшения качества воды и нарушения условий водопользования, повышает риск возникновения кишечных инфекций и интоксикаций у населения в связи с поступлением сточных вод, содержащих патогенных микроорганизмы, пестициды, тяжелые металлы и др. Экологическая ситуация в Республике Узбекистан в последние годы является проблемой регионального и общегосударственного характера и это в большой степени отражается на состоянии природных водных объектов города Ташкент и главным образом, р. Чирчик - основного водного русла города, являющегося источником хозяйственно-питьевого и рекреационного водопользования населения города. Река Чирчик относится к пресным поверхностным проточным водам. Значительный сброс загрязняющих веществ в окружающую природную среду со сточными водами связан, прежде всего, с неэффективной работой очистных сооружений и усугубляется общей экологической обстановкой. Пробы отбирались вдоль русла р. Чирчик, протекающей через г. Ташкент: 1 - Проба №1 (русло канала Анкор, Монумент Мужеству); Проба №2 (русло реки Чирчик, промзона Сергели); Проба №3 (русло реки Чирчик, Газалкентский гидроузел); Проба №4 (пруд в Чирчикском лесном хозяйстве). По результатам исследования воды из р. Чирчик были выявлены микроорганизмы, принадлежащие ко всем исследованным группам кроме сульфатредукторов (таблица 2).

Таблица 2 - Микробиологический анализ вод р. Чирчик, г. Ташкент

№	Координаты места отбора проб	t, °C	pH	МПА	Эндо	МПБ	Гильтая	Чапека	Постейта
1	41°19'25.26"N 69°16'16.18"E	+14,0	6,0	1,25x10 ⁴	4,5 КОЕ/мл	2,5x10 ²	2,5x10 ²	0,5x10 ¹	-
2	41°11'09.87"N 69°14'56.12"E	+19,0	5,0	1,16x10 ⁵	1,0x10 ²	6,0x10 ³	6,0x10 ¹	-	-
3	41°24'53.38"N 69°35'21.42"E	+17,0	6,0	3,45x10 ³	4,0x10 ¹	2,5x10 ²	6,0x10 ¹	1 CFU/ mL	-
4	41°22'36.33"N 69°31'29.26"E	+23,0	5,0	6,15x10 ⁴	-	2,5x10 ³	-	-	-

Анализируя полученные данные по микробиологическому обследованию образцов почв г. Ташкента, в разной степени подвергшихся антропогенному воздействию, выявлено, что микробные сообщества в исследуемых образцах имеют ряд особенностей. По сравнению с почвами парковых зон (образцы 3, 4, 5, 7) в придорожных городских почвах (образцы 1, 2, 6) снижено содержание мицелия грибов, основных почвообразующих организмов – деструкторов органических остатков (таблица 3).

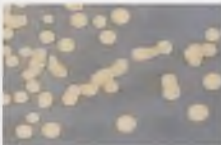
Таблица 3 - Микробиологическое обследование почв территории г. Ташкента

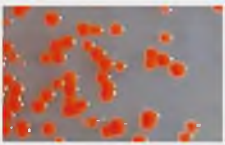
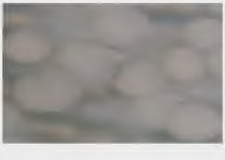
№	БГКП	Денитрификаторы	Олигонитрофилы	Нитрификаторы	Сульфат редуكتورы	Сапрофиты	МПА+сусло	Аммонификаторы
1	-	1,3x10 ³	3,9x10 ⁶	2,5x10 ³	10 ¹	5,9x10 ⁵	-	10 ¹
2	10 ¹	2,0x10 ⁴	3,1x10 ⁶	-	2,5x10 ¹	1,35x10 ⁶	5,2x10 ⁴	2,5x10 ²
3	-	6,0x10 ²	6,1x10 ⁶	2,5x10 ³	2,5x10 ¹	8,2x10 ⁵	3,2x10 ⁴	2,5x10 ³
4	6,0x10 ¹	1,3x10 ⁴	8,1x10 ⁶	-	2,5x10 ¹	1,22x10 ⁶	7,0x10 ⁴	-
5	-	2,5x10 ²	1,15x10 ⁶	2,5x10 ³	10 ¹	4,4x10 ⁵	3,2x10 ⁴	2,5x10 ²
6	-	6,0x10 ²	5,35x10 ⁶	2,5x10 ³	-	3,6x10 ⁶	3,6x10 ⁵	2,5x10 ³
7	1,5x10 ¹	6,0x10 ¹	3,75x10 ⁶	-	10 ¹	6,7x10 ⁵	1,8x10 ⁵	5,0x10 ³

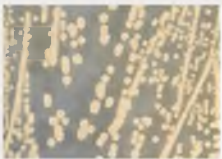
При этом ухудшаются условия роста растений. Отмечено снижение целлюлолитических микроорганизмов в придорожных почвах по сравнению с почвами рекреационных зон, которые обладают более высокой растительной биомассой, что согласуется с данными авторов [8-11].

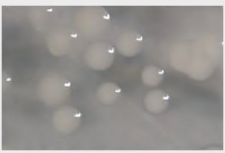
В результате обследования эконис г. Ташкента, создана коллекция наиболее представительных видов микроорганизмов, которая может служить ценным источником для изучения и дальнейшего использования полученных штаммов (таблица 4).

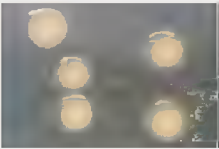
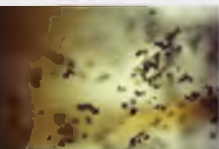
Таблица 4 - Краткая характеристика представительных видов микроорганизмов эконис г. Ташкента

№	Название штамма	Место и дата выделения	Краткое описание	Краткое описание	Биотехнологический потенциал
1	<i>Bacillus licheniformis</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Грамположительная, мезофильная бактерия, 2-3 мкм. Оптимальная температура для роста +50°C.		Одна из самых важных бактерий в производстве промышленных ферментов – щелочная сериновая протеаза и альфа-амилаза.
2	<i>Bacillus simplex</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Грамвариабельная палочковидная подвижная спорообразующая бактерия, диаметр 0,7-0,9 мкм. Оптимальная температура для роста 25-37°C.		Обладает потенциалом для повышения урожайности и роста растений.
3	<i>Bacillus cereus</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Грамположительная подвижная спорообразующая палочка, 1x3-4 мкм. Хеморганогетеротроф. Оптимальная температура – 30-32°C.		Индикаторный тест-организм для пищевой промышленности
4	<i>Pantoea agglomerans</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Грамотрицательная подвижная аэробная бактерия, 0,5-1x1-3 мкм. Оптимальная температура для роста 28-30°C.		Конкурент фитопатогенов, продуцент антибиотиков, некоторые продукты могут выступать в качестве консервантов.

5	<i>Serratia marcescens</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Прямые подвижные (перитрихи), грамотрицательные палочки. Размеры 0,9–2,0×0,5–0,8 мкм. Оптимальная температура для роста 25–30°C.		Обладает антимикробным свойством благодаря пигменту продигизину.
6	<i>Listeria grayi</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Грамположительная, неспорообразующая, негемолитическая, факультативно-анаэробная, подвижная бактерия, 0,4–0,5×0,5–2 мкм. Температурный диапазон +3 – +45°C		Не считается патогеном человека и животных.
7	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Подвижная грамотрицательная палочковидная бактерия, 0,4–0,7×0,7–1,8 мкм. Оптимальная температура для роста 32–35°C.		Является стимулятором роста томатов в условиях солевого стресса.
8	<i>Achromobacter piechaudii</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Палочковидная, подвижная, аэробная грамотрицательная бактерия, 0,8–1,2×2,5–3 мкм. Оптимальная температура для роста 30–35°C.		Способствует росту растений за счет производства ИУК и АЦК-дезаминазы.
9	<i>Bacillus mycoides</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Грамположительные палочки, неподвижные, 1,0–1,2×3,0–5,0 мкм. Диапазон температуры для роста от +10 до +40°C.		Рассматривается в качестве активного ингредиента средств защиты растений.
10	<i>Pseudomonas putida</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Грамотрицательные подвижные палочки, расположенные парно, 0,2–0,6 мкм, аэроб, вырабатывает пигмент пиовердин. Оптимальная температура для роста +28–30°C.		Может использоваться в качестве биодеструктора нефти и пенополистирола.

11	<i>Pseudomonas trivialis</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Флуоресцирующая грамотрицательная мезофильная подвижная бактерия, 0,8х1,6-3,3 мкм. Оптимальная температура для роста 28-37°C.		Стимулятор роста растений.
12	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Грамотрицательная палочковидная неспорообразующая бактерия, длина которой обычно составляет 1-3 мкм, а ширина — 0,5-0,8 мкм. Оптимальная температура для роста +30-32°C		Способны восстанавливать металлы и разлагать углеводороды.
13	<i>Bacillus sp. [4]</i> CICC 23999- CICC	г. Ташкент, снежный покров, 2023	Прямые палочки с закругленными концами, слабоподвижные 1-1,2х3-10 мкм, по 1-2, цепочки до 7. Грамположительные.		Хорошо растет при +450С. Способен продуцировать термостабильную эстеразу.
14	<i>Bacillus muralis</i>	г. Ташкент, снежный покров, 2023	Прямые палочки, диаметром 0,7-0,8 мкм, грамвариабельные, одиночные клетки подвижны, в цепочках — неподвижные. Эндоспоры эллипсоидальной формы, располагаются центрально или парацентрально. Оптимальная температура для роста от +20 до +30°C.		Устойчива к 15% концентрации NaCl. Продукент индола.
15	<i>Psychrobacter immobilis</i>	г. Ташкент, снежный покров, 2023	Неподвижная грамотрицательная коккобактерия, 0,4-1,8*0,4-1,6 мкм. Диапазон температур для роста от -10 до +42°C.		Продукент липазы и эстеразы.

16	<i>Bacillus pumilus</i>	г. Ташкент, дождевая вода, 2023	Небольшие прямые палочки (около 0,7 мкм) с закругленными концами, чаще расположены одиночно или парами, реже - цепочками. Отмечается спорообразование по бациллярному типу. Грамположительна. Оптимальная температура для роста +37°C.		Продуцент гибберелинов и ИУК. Способен к растворению фосфатов.
17	<i>Pseudomonas chlororaphis</i>	Ташкентская область, вода горной реки, 2023	Подвижные палочки с полярными жгутиками, 1-1,5x1,5-2,5 мкм, флюоресценция зеленоватого цвета. Оптимальная температура для роста +28°C.		Продуцент антибиотиков, биодеструктор органических соединений. Используется для фитореимедиации почв.
18	<i>Staphylococcus hominis</i>	Ташкентская область, вода горной реки, 2023	Грамположительные кокки, обычно от 1,2 до 1,4 мкм в диаметре. Оптимальная температура для роста +30-37°C.		Может вызывать инфекцию у пациентов с нарушенным иммунитетом.
19	<i>Bacillus subtilis</i>	Ташкентская область, горная почва, 2023	Вид грамположительных спорообразующих аэробных бактерий, 0,7x2-8 мкм. Диапазон температуры для роста от +50C до +45°C.		Может выступать в качестве антагониста к патогенам. Способен продуцировать антибиотики, аминокислоты, витамины и др.
20	<i>Acinetobacter johnsonii</i>	Ташкентская область, вода реки Чирчик, 2023	Грамотрицательные короткие пухлые палочки размером 1,0-1,5x1,5-2,5 мкм. Оптимальная температура для роста 33-35°C.		Может использоваться для разложения пестицидов.

21	<i>Pseudomonas putida</i>	Ташкентская область, вода реки Чирчик, 2023	Грамотрицательные подвижные неспорообразующие одиночные палочки размером 0,2-0,3x0,5-0,8 мкм. Оптимальная температура для роста +30°C.		Применяется в биоремедиации и в качестве биодеструктора нефтепродуктов.
22	<i>Lactobacillus murinus</i>	Ташкентская область, вода реки Чирчик, 2023	Грамположительные неподвижные палочки, часто собираются в цепочки. Размер 0,8-1,0x2,0-4,0 мкм. Оптимальная температура для роста +30°C.		Пробиотик широкого спектра действия.
23	<i>Acinetobacter bohemicus</i>	Ташкентская область, вода реки Чирчик, 2023	Грамотрицательные строго аэробные неподвижные коккобактерии, размер 1,0-1,5x1,5-2,5 мкм. Оптимальная температура для роста +25-32°C.		Могут быть причиной многих инфекционных процессов.
24	<i>Trichoderma afroharzianum</i>	г. Ташкент, почва, 2022	Цвет колоний зеленый, край колоний гладкий, форма конидий Subglobose to ovoid, размер конидий (μm) 3.1-3.4, форма фиалида от лагениформного до ампулоидного, размер фиалида (μm) 3.9-7.2		Играют ключевую роль в микробном сообществе и используются во многих областях сельского хозяйства и биотехнологии.

Вывод и рекомендации. Таким образом, вопрос поддержания и защиты микробного разнообразия городских экониш ставит важные задачи, которым необходимо уделить внимание, в том числе: влияние антропогенных факторов и изменений экониш на многофункциональность микробной экосистемы, взаимосвязь между микробным разнообразием и здоровьем человека, а также возможность использования ценных свойств микроорганизмов для нужд человечества.

Отдельно следует отметить работу по выделению наиболее представительных культур, определению их биотехнологического потенциала и созданию коллекции наиболее представительных видов микроорганизмов различных экониш г. Ташкент и Ташкентской области, которая включает 23 штамма бактерий, 2 штамма актиномицетов и 3 штамма микроскопических грибов,

так как все выделенные микроорганизмы имеют определённую промышленную важность, которая может служить ценным источником для изучения и дальнейшего использования полученных микроорганизмов.

Область применения исследований. Созданная в результате обследования различных эконис г, Ташкент, коллекция наиболее представительных видов микроорганизмов, может служить ценным источником для изучения и дальнейшего использования полученных штаммов в различных отраслях и служить ценным источником для получения биопрепаратов широкого спектра действия.

Источник финансирования исследований. Исследование проводилось за счет средств государственного бюджетного финансирования лаборатории биоразнообразия микроорганизмов Института микробиологии АН РУз.

References /Список литературы (см. страница 16)

ПИЩЕВАЯ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

IRSTI 65.37.03

https://doi.org/10.53939/1560-5655_2025_4_30

Iztaev A.I.¹, Yakiyayeva M.A.¹, Zhakatayeva A.N.²

¹Almaty Technological University, Almaty c., Kazakhstan

²Kazakh Research Institute of Agriculture and Plant Growing,
Almalybak settlement, Almaty Region, Kazakhstan

STUDY OF STORAGE PERMANENCE OF SUGAR BEET UNDER OZONE AND ION OZONE TREATMENT

Abstract. The article presents the results of a study on the preservation of sugar beet roots after treatment with ozone and ion-ozone flows. The aim of the study was to extend the storage period of raw materials for sugar production through antibacterial treatment and loss minimization. Innovative ozone and ion-ozone treatment technologies were applied to eliminate pathogenic microflora and prevent decay. Ozone (O₃) has disinfectant properties, effectively destroying bacteria, mold spores, and fungi. Ion-ozone flows, combining ozone with negatively charged ions, enhance the antibacterial effect. During the experiment, the respiration intensity of the roots, metabolic process dynamics, and the degree of ozone and ion-ozone impact were assessed. A quantitative analysis of product changes was conducted, including: mass loss, the number of affected roots, the extent of mechanical damage, total losses (moisture loss, rot, mold), and the percentage of preserved high-quality roots. A phytopathological evaluation revealed a reduction in disease incidence. The results confirmed that ozone and ion-ozone treatment reduces losses and extends storage time while maintaining the commercial appearance and taste quality. This highlights the potential of the technology for the sugar industry as an effective and environmentally safe method of raw material storage.

Keywords: sugar beet, storage, ozone, ion-ozone, treatment.

Introduction. Sugar beets are accepted in batches. A batch is any quantity of beets delivered in one transport unit and documented by one document. Before weighing, the beets are inspected by the control and, based on their physical condition, ripeness, general contamination and data from the pre-harvest chemical and phytopathological examination of crops, they are distributed according to storage periods [1-2]. Modern progressive technology for the acceptance and storage of sugar beet roots harvested by a combine provides for the following key activities: pre-harvest mass chemical and phytopathological examination of beet crops; acceptance of beets in strict accordance with the requirements of GOST 17421; distribution of beets into categories according to storage and processing periods;

additional cleaning of beets from impurities before placing them in piles; use of chemicals for treating beets placed for storage; ventilation of piles with humidified air; use of automated temperature control and regulation devices; protection of beets from wilting and freezing (applying a layer of lime milk to the surface of the piles and covering them with heat-insulating materials); use of floating platforms equipped with active ventilation systems for short-term storage of beets and their delivery for processing; use of mechanisms for feeding beets from piles for processing, ensuring minimal losses of beet mass and sugar [3-4].

Beets delivered from the fields in trucks with sides are unloaded and placed in piles: in pile fields - with the help of mobile beet stackers, in mechanized warehouses and platforms with hard surfaces - with the help of frontal beet stackers on pneumatic wheels or rails [5-6].

When beets are frozen correctly, respiration and all metabolic processes in the root crops stop. The chemical composition and technological qualities of frozen and fresh beets are practically the same.

Enzymes are not inactivated during freezing. When the roots are thawed, their activity is restored, which is confirmed by the blackening of the beet tissue and the rapid hydrolysis of sucrose [7-8].

It has also been established that freshly dug, un-dried, washed beets with a content of heavily damaged roots of no more than 15% and green mass of no more than 3% are stored well. Dried roots after washing are stored worse than unwashed ones.

The success of storage largely depends on the gas composition of the silt air, in particular the ratio of carbon dioxide and oxygen. The most favorable conditions for storing mother roots are created if the silt air contains 12-14% oxygen and about 5% carbon dioxide. When storing beet mother roots in conditions of increased carbon dioxide concentration, not only are there losses in weight and sugar (due to more intense respiration), and the greater the loss, the more carbon dioxide in the storage, but their seed productivity also decreases. In the experiments of N. I. Korzhenko (VNIS), when storing mother roots for a month in a storage facility where the carbon dioxide concentration was about 60%, they lost their ability to germinate. The death of the central bud was observed in 16.3% when stored for 20 days and in 30% when stored for 30 days without air access to the storage facility. The average seed yield from one plant was 90 and 75 g, and when stored without air access for 10 days - 123 g. In the absence of aeration, which can be in piles of beets, the accumulation of carbon dioxide quickly increases. The temperature in the storage facility is also important. If it is within 0°, 2°C, then carbon dioxide accumulates gradually and, accordingly, the oxygen content in the storage facilities decreases. If the temperature is 8°C and above, then the amount of carbon dioxide can already be 25-30% on the fifth day if there is no air access to the storage facility. From this follows the practical conclusion that long-term storage of mother root crops in piles where aeration is impaired inevitably leads to both losses of stored root crops and a decrease in their seed productivity [9-10].

The gas composition of the air in the storage facility can also change depend-

ing on the degree of contamination of the beets. Adherent dirt clogs the surface of the root crops and the spaces between them, which complicates aeration, increases the temperature, resulting in increased activity of microorganisms and increased respiration intensity.

For normal storage of beets, an excessive amount of not only carbon dioxide, but also oxygen is harmful. A decrease in the oxygen level in the environment increases cold resistance, enrichment of the environment with carbon dioxide weakens beet respiration, and enrichment with oxygen stimulates respiration. Good storage of beets requires moderate respiration. A significant amount of carbon dioxide formed during respiration is retained by root crops, and if fresh air is provided, the carbon dioxide is immediately released. It should be taken into account that the main causative agent of pile rot, the fungus *Botrytis cinerea*, is an aerobe, so an influx of oxygen can stimulate its development [11-12]. Measures to prevent disruption of the normal gas composition of the air in the storage facility: follow the recommendations for the depth of trenches and the height of the pile cover; do not allow increased soil moisture and severe contamination of beets, do not allocate areas with saucers, with a high groundwater level, on heavily waterlogged soils for the pile field; in the spring, do not delay the removal of root crops after removing the earth cover.

Research methods. During the experiment, sugar beet was treated with ozone and ion ozone flows in various modes, which differed in:

- Ozone concentration (depending on the type of treatment);
- Duration of exposure (treatment time intervals);
- Temperature conditions of storage after treatment.

Evaluation of the treatment efficiency included a comprehensive study of the condition of root crops at different stages of storage. The following analyses were carried out:

1. Determination of respiration intensity – measurement of carbon dioxide emission to assess the metabolic activity of root crops. High respiration intensity indicates accelerated decomposition processes and reduced shelf life.
2. Quantitative analysis of stored products – weighing and recording the mass of products at different stages of storage to identify the dynamics of losses.
3. Phytopathological assessment of root crops – study of the presence and prevalence of fungal and bacterial diseases, assessment of the degree of damage and identification of pathological changes.

Determination of respiration intensity. When conducting all kinds of studies with the storage of tubers or vegetables, a convenient method is to determine respiration in hermetically sealed desiccators. The essence of the method is that the released carbon dioxide is absorbed by caustic soda to form carbonates, the amount of which is calculated by the difference in titration of the resulting solution in the presence of phenolphthalein and methyl orange.

Desiccators must be closed hermetically. The tightness of desiccators is checked as follows: ignited paper is placed in a prepared dry desiccator and

closed; if after 24 hours the desiccator maintains a vacuum, then it is hermetically sealed and can be used for the experiment.

The size of the desiccator depends on the size of the sample and the duration of the experiment. The calculation should be such that by the end of the experiment, about half of the oxygen contained in the desiccator is used by the sample. To ensure the tightness of the desiccator lid, grease it with petroleum jelly or grease. The experiment requires 0.5 N HCl and NaOH solutions, as well as solutions of phenolphthalein and methyl orange indicators.

Usually, an average sample of vegetables is taken, 0.5-1 kg of tubers. Each determination is carried out in 2.3-fold repetition, for which the appropriate number of typical and identical samples are prepared. 50 ml of 0.5 N alkali is placed on the bottom of the desiccator in a Petri dish (the respiration rate does not exceed 10 mg CO₂ per hour, and the sample is 0.5 kg). This operation should be carried out as quickly as possible so that the alkali absorbs less CO₂ from the air. At the same time, the same desiccators are placed, but without vegetables (control for alkali).

Tubers or vegetables are usually kept over alkali for 12-24 hours. To obtain comparable data, the determination must be carried out at the same temperature, since the respiration rate is highly dependent on temperature. Samples are placed one by one on the insert stands in prepared desiccators with alkali, so that the root vegetables do not touch the alkali and dirt does not get into the alkali. Samples are removed in the same order in which they were placed. Alkali is poured into flasks and tightly closed. 10 ml of alkali is taken for titration in 2 replicates: if the data of parallel titrations do not match, then the number of repeated titrations is increased. Titration is carried out with 0.5 N hydrochloric acid, first in the presence of 1-2 drops of phenolphthalein until discoloration, and then with the addition of methyl orange (1-2 drops) until the color changes. The respiration rate is determined by the amount of carbon dioxide released (mg) by 1 kg of vegetables in 1 hour at a predetermined temperature (taken into account in each individual case).

$$x = \frac{a \cdot 2k \cdot 11A}{T \cdot P \cdot B}$$

where:

a – difference in titrations for phenolphthalein and methyl orange (minus the difference in titration control for alkali), ml.

k – correction to the acid titer.

A – volume of alkali stirred in a desiccator, ml.

B – volume of alkali taken for titration, ml.

T – exposure time, hours.

P – sample weight, kg.

$$\text{Respiration intensity of sugar beet: } J = \frac{a k \cdot 5.5 A}{T \cdot P \cdot B}$$

where:

a – difference in titrations for phenolphthalein and methyl orange (minus the difference in titration control for alkali) – ml (c.p.)

A – volume of alkali stirred in a desiccator, 50 ml

B – volume of alkali taken for titration, 10 ml

T – exposure time, 5 hours

P – sample weight, 1 kg

5.5 – conversion factor for ml NaOH of absorbed CO₂ per mg CO₂

For 1 ml of 0.1 N alkali solution there are 2.2 mg of CO₂, and for 1 ml of 0.25 N alkali solution there are:

0.1 N - 2.2 mg of CO₂

0.25 N - x

$$x = \frac{0.25 \cdot 2.2}{0.1} = 5.5$$

k – acid titer correction

$k = \frac{\text{ml alkali}}{\text{ml acid}}$ used for titration with phenolphthalein

$$k = \frac{10 \text{ ml NaOH}}{10 \text{ ml HCl}} = 1 \quad \text{For 10 ml of 0.25 N NaOH,}$$

10 ml of 0.25 N HCl were added.

$$J = \frac{a \cdot k \cdot 5.5 \cdot A}{T \cdot P \cdot B} = \frac{a \cdot 1 \cdot 5.5 \cdot 50}{5 \cdot 1 \cdot 10} = a \cdot 5.5$$

Methodology of research on storage of root crops. For long-term storage, root crops are grown on fertile soils. The crop should be grown in compliance with the basic requirements of agricultural technology: maintaining crop rotation, with rational use of fertilizers, pesticides and irrigation. The soil should not contain pathogens, especially phomosis and gray rot. Pure varieties of seeds from one batch are used for sowing.

The following parameters were analyzed during storage:

- Weight loss - quantitative loss of root crop weight due to moisture evaporation and metabolic activity.
- Number of diseased root crops - the proportion of root crops affected by phytopathogens (rot, mold and bacterial infections).
- Mechanical damage - assessment of external defects and injuries that occurred during harvesting and transportation.
- Total losses - a combination of all forms of losses, including natural loss, damage and disease.
- Storage quality – percentage of healthy root crops suitable for further processing after certain storage intervals.

Harvesting and storage selection must be done before frost sets in. Experimental products should be taken to a permanent storage location on the day of harvesting so that the root crops do not lose some of their moisture and do not absorb it from the humid air, which may affect their storage quality. After the root crops are brought to the storage facility, they should be kept for several days to level out their turgor state. All variants of one experiment should be laid out within one day. Only healthy, clean, dry, not damaged by pests and diseases, without mechanical damage, not wilted medium-sized root crops, characteristic of the variety and harvest of the given year, are laid out in the experiment. The laid out root crops must meet the requirements of GOST. The difference in the size of the root crops affects the intensity of respiration, moisture evaporation, chemical composition, mechanical strength, and other indicators. Differences in weight loss can be large, so it is necessary to lay medium-sized root crops and the same in different variants.

The weight of the registration sample for vegetables with medium and large root crops, the number of repetitions is not less than 3. The element of comparison must be mandatory, so one of the variants must be a control (standard). One control must fall on 10-12 variants.

The scheme of a single-factor experiment must be built in compliance with the principle of a single difference, with the identity of other conditions. In the storage facility for storing root crops, it is necessary to bring the temperature to the optimum as soon as possible. In the locations of all experimental variants, including the control, the same optimum storage mode must be created. It is recommended to store at a temperature of 0°C with fluctuations in the range from -0.5 to +1°C at a relative air humidity of 95-98%. Beets - at a temperature of +1°C, not lower than 0, at a relative air humidity of not higher than 95%. When removing samples from storage, a complete analysis of quantitative changes in the preserved products and a phytopathological assessment are carried out:

- weight loss (losses from respiration and evaporation), determined by the difference in the weight of the registration sample when placing it in storage and removing it after long-term storage;
- the yield of full-fledged root crops, determined by weighing the preserved full-fledged product;
- absolute waste, determined by weighing the product unsuitable for consumption and its ratio to the weight of the stored sample is determined;
- the number of diseased root crops (products affected by diseases are selected taking into account the types of diseases);
- other losses (frozen, wilted) are taken into account separately or in combination with other waste or as absolute waste;
- sprouted root crops characterize the degree of exit from the dormant state. The percentage of sprouted root crops in the registration sample is determined;
- total losses, consisting of weight loss and absolute waste;

The results of the surveys are expressed as a percentage of the mass of root crops stored.

To determine qualitative changes during storage, the biochemical composition is studied. Biochemical analyses are carried out according to generally accepted methods before and after laying the root crops for storage. Changes in dry matter, sugars, vitamin C, and carotene are determined. The sample for chemical analysis must consist of at least 10 root crops and completely represent the average sample from the experimental variant. The analysis is carried out on the day of sampling. Root crops are analyzed without stripping the integumentary tissues.

Results and discussion. Preservation of sugar beet of the Koksus district farm under ozone treatment. The shelf life of sugar beet characterizes the level of unlost mass when harvesting, expressed as a percentage. Total mass loss of sugar beet consists of natural loss (%), diseased strawberries (%), mechanical damage (%).

Research was conducted to determine the shelf life of sugar beet minus total mass loss, which was determined in three replicates by different methods of long-term storage of sugar beet with ozone treatment in the Koksus district of Almaty region.

The results of the shelf life of sugar beet research are given in Table 1.

According to the results of the evaluation of the shelf life of sugar beet from the Koksus district farm, stored under various storage methods, it was noted that all variants with ozone treatment in the ridge, hermetic and trench storage methods exceed the control variants in shelf life. The shelf life of sugar beet in hermetic storage conditions with ozone treatment exceeds other storage methods. Storage of sugar beet from the Merke sugar plant treated with ion ozone flow. Similarly, a study was conducted to determine the shelf life of sugar beet using different storage methods (cage, sealed and trench) with ion-ozone treatment in three replicates. The following losses were also determined: natural losses (%), diseased strawberries (%), mechanical damage (%), summing them up, the total losses were established, masses, which allowed us to establish the shelf life of sugar beet using different storage methods. The results of the study to determine the shelf life of sugar beet using different methods of long-term storage are shown in Table 2.

Table 1 – Change in the shelf life of sugar beet during long-term storage using different storage methods, ozone treatment

Name of samples	Repetition	Weight at ex-traction, g	Weight loss		Sick		Mechanical damage		Total losses		Storability	
			g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
Cagat - control	I	4565	435	8,7	300	6,0	0	0	735	14,7	4265	85,3
	II	4630	370	7,4	285	5,7	0	0	655	13,1	4345	87,0
	III	4600	400	8,0	275	5,5	0	0	675	13,5	4325	86,5
	average	4598	401	8,0	287	5,7	0	0	689	13,8	4311	86,2
OZ (Cagat -1)	I	4710	290	5,8	230	4,6	30	0,6	550	11,0	4450	89,0
	II	4685	315	6,3	205	4,1	20	0,4	540	10,8	4460	89,2
	III	4645	355	7,1	150	3,0	0	0	505	10,1	4495	90,0
	average	4680	320	6,4	195	3,9	17	0,3	532	10,6	4468	89,3
OZ (Cagat -2)	I	4705	295	5,9	150	3,0	0	0	445	8,9	4555	91,1
	II	4705	295	5,9	170	3,4	0	0	465	9,3	4535	90,7
	III	4675	325	6,5	190	3,8	0	0	515	10,3	4485	89,7
	average	4695	305	6,1	170	3,4	0	0	475	9,5	4525	90,5
Hermetically sealed - control	I	4565	435	8,7	390	7,8	0	0	825	16,5	4175	83,5
	II	4565	435	8,7	370	7,4	70	1,4	875	17,5	4125	82,5
	III	4560	440	8,8	420	8,4	10	0,2	870	17,4	4130	82,6
	average	4763	437	8,7	393	7,8	26	0,5	856	17,1	4144	82,9
OZ (hermetically sealed – 1)	I	4800	200	4,0	240	4,8	0	0	440	8,8	4560	91,2
	II	4780	220	4,4	180	3,6	0	0	400	8,0	4600	92,0
	III	4750	250	5,0	90	1,8	0	0	340	6,8	4660	93,2
	average	4778	223	4,5	170	3,4	0	0	393	7,8	4607	92,1

OZ (hermetically sealed – 2)	I	4850	150	3,0	100	2,0	0	0	250	5,0	4750	95,0
	II	4820	180	3,6	90	1,8	0	0	270	5,4	4730	94,6
	III	4810	190	3,8	70	1,4	0	0	260	5,2	4740	94,8
	average	4827	173	3,5	86	1,7	0	0	259	5,1	4741	94,8
Trench closure - control	I	4612	388	7,7	590	11,8	20	0,4	998	19,9	4002	80,0
	II	4515	485	9,7	470	9,4	0	0	955	19,1	4045	80,9
	III	4525	475	9,5	480	9,6	0	0	955	19,1	4045	80,9
	average	4551	449	9,0	513	10,2	6	0,1	968	19,3	4032	80,6
OZ (Trench closure – 1)	I	4625	375	7,5	100	2,0	0	0	475	9,5	4525	90,5
	II	4735	265	5,3	205	4,1	30	0,6	500	10,0	4500	90,0
	III	4595	405	8,1	380	7,6	0	0	785	15,7	4215	84,3
	average	4652	348	6,9	228	4,5	10	0,2	586	11,7	4414	88,2

Table 2 – Change in the shelf life of sugar beet during long-term storage using different storage methods with ion ozone treatment

Name of samples	Repetition	Weight at ex- traction, g	Weight loss		Sick		Mechanical damage		Total losses		Storability	
			g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
Cagat - control	I	4700	300	6,0	1015	20,3	0	0	1315	26,3	3685	73,7
	II	4465	535	10,7	1120	22,4	0	0	1655	33,1	3345	66,9
	III	4505	495	9,9	550	11,0	0	0	1045	20,9	3955	79,1
	average	4557	443	8,8	895	17,9	0	0	1338	26,7	3662	73,2
IOZ (Cagat -1)	I	4600	400	8,0	70	1,4	0	0	470	9,4	4530	90,6
	II	4715	285	5,7	185	3,7	0	0	470	9,4	4530	90,6
	III	4735	265	5,3	185	3,7	70	1,4	520	10,4	4480	89,6
	average	4683	317	6,3	147	2,9	23	0,4	487	9,7	4513	90,2

IOZ (Cagat -2)	I	4690	310	6,2	205	4,1	0	0	515	10,3	4485	89,7
	II	4670	330	6,6	100	2,0	0	0	430	8,6	4570	91,4
	III	4710	290	5,8	320	6,4	0	0	610	12,2	4390	87,8
	average	4690	310	6,2	208	4,8	0	0	518	10,4	4482	89,6
Hermetically sealed - control	I	4550	450	9,0	300	6,0	20	0,4	770	15,4	4230	84,6
	II	4630	370	7,4	480	9,6	10	0,2	860	17,2	4140	82,8
	III	4585	415	8,3	420	8,4	0	0	835	16,7	4165	83,3
	average	4588	412	8,2	400	8,0	10	0,2	822	16,4	4178	83,5
IOZ (hermetically sealed – 1)	I	4860	140	2,8	370	7,4	0	0	510	10,2	4490	89,8
	II	4845	155	3,1	250	5,0	0	0	405	8,1	4595	91,9
	III	4790	210	4,2	245	4,9	0	0	455	9,1	4545	90,9
	average	4831	169	3,3	288	5,8	0	0	457	9,1	4543	90,8
IOZ (hermetically sealed – 2)	I	4715	285	5,7	175	3,4	15	0,3	475	9,5	4525	90,5
	II	4735	265	5,3	175	3,4	20	0,4	460	9,2	4540	90,8
	III	4715	285	5,7	105	2,1	0	0	390	7,8	4610	92,2
	average	4722	278	5,5	151	3,0	11	0,2	440	8,8	4560	91,2
Trench closure - control	I	4630	370	7,4	415	8,3	0	0	785	15,7	4215	84,3
	II	4465	535	10,7	740	14,8	0	0	1275	25,5	3725	74,5
	III	4535	465	9,3	950	19,0	30	0,6	1415	28,3	3585	71,7
	average	4544	456	9,1	701	14,0	10	0,2	1157	23,1	3843	76,8
IOZ (Trench closure – 1)	I	4650	350	7,0	165	3,3	0	0	515	10,3	4485	89,7
	II	4585	415	8,3	250	5,0	0	0	665	13,3	4335	86,7
	III	4645	355	7,1	210	4,2	0	0	565	11,3	4435	88,7
	average	4627	373	7,5	208	4,1	0	0	581	11,6	4419	88,4

According to the results of the evaluation of the shelf life of sugar beet from the Merke District farm, stored under various storage methods, it was noted that all options with ion ozone treatment under pile, hermetic and trench storage methods exceed the control options in shelf life. The shelf life of sugar beet under hermetic storage conditions with ion ozone treatment exceeds other options.

Phytopathological assessment of sugar beet harvest from a farm in Koksudistrict with ozone treatment. Quantitative and qualitative losses of sugar beet during long-term storage occur mainly from diseases caused by pathogenic microorganisms such as gray mold (*Botrytis cinerea*), phomosis (*Phoma betae*) and fusarium (*Fusarium* spp). Establishing the loss of sugar beet from the above types of diseases allows for a phytopathological assessment of the condition of sugar beet during long-term storage. In this regard, the effect of ozone treatment on changing the content of these types of diseases of sugar beet roots is of great scientific and practical interest. The results of the study, on the phytopathological assessment of sugar beet from the Koksudistrict farm with ozone treatment, are shown in Table 3.

From the data in Table 3 it is evident that the total losses from sugar beet disease in the control samples are from 5.7% to 10.2%, with pile storage from 3.4% to 3.9%, with hermetically sealed storage from 1.7% to 3.4%, with trench storage from 3.0% to 4.5%. The greatest losses are due to gray rot from 1.6% to 4.6%, then phomosis and fusarium. According to the results of phytopathological assessment of sugar beet from the farm of Koksudistrict with different storage methods, it follows that the incidence of beet diseases in the control variants with all storage methods is higher than with ozone treatment. It should be noted that the lower incidence of diseases is under hermetically sealed storage conditions with ozone treatment.

Phytopathological assessment of sugar beet from the Merke district farm during ion ozone treatment. We conducted experimental studies to establish the effect of ion ozone treatment on the state of the general disease and on individual types: gray mold, phomosis and fusarium of sugar beet. The results of the study on the phytopathological assessment of the state of sugar beet from the farm of the Merke district are given in Table 4.

From the data in Table 4 it is evident that the total losses are from (min) to (max), including gray rot from 1.0 to 8.1%, phomosis from 0.8% to 6.6% and fusarium from 0.4% to 3.4%.

Table 3 – Phytopathological condition of sugar beet by diseases during ozone treatment

Name of samples	Recurrence	Losses from diseases		Botrytis cinerea (gray rot)		Phoma betae (phoma blight)		Fusarium spp (fusarium wilt)	
		g	%	g	%	g	%	g	%
Cagat - control	I	300	6,0	170	3,4	75	1,5	65	1,3
	II	285	5,7	190	3,8	0	0	95	1,9
	III	275	5,5	100	2,0	105	2,1	70	1,4
	average	287	5,7	153	3,0	60	1,2	76	1,5
OZ (Cagat -1)	I	230	4,6	110	2,2	60	1,2	60	1,2
	II	205	4,1	80	1,6	70	1,4	55	1,1
	III	150	3,0	70	1,4	80	1,6	0	0
	average	195	3,9	86	1,7	70	1,5	38	0,7
OZ (Cagat -2)	I	150	3,0	60	1,2	60	1,2	20	0,4
	II	170	3,4	80	1,6	50	0,5	40	0,8
	III	190	3,8	100	2,0	45	0,9	45	0,9
	average	170	3,4	80	1,6	51	1,1	35	0,6
Hermetically sealed - control	I	390	7,8	180	3,6	110	2,2	100	2,0
	II	370	7,4	120	2,4	130	2,6	120	2,4
	III	420	8,4	190	3,8	120	2,4	110	2,2
	average	393	7,8	163	3,2	120	2,4	110	2,2
OZ (hermetically sealed – 1)	I	240	4,8	90	1,8	150	3,0	0	0
	II	180	3,6	80	1,6	50	0,5	50	0,5
	III	90	1,8	90	1,8	0	0	0	0
	average	170	3,4	86	1,7	66	1,4	16	0,3
OZ (hermetically sealed – 2)	I	100	2,0	100	2,0	0	0	0	0
	II	90	1,8	45	0,9	45	0,9	0	0
	III	70	1,4	30	0,6	0	0	40	0,8
	average	86	1,7	58	1,2	15	0,3	13	0,2

Trench closure - control	I	590	11,8	290	5,8	150	3,0	150	3,0
	II	470	9,4	170	3,4	170	3,4	130	2,6
	III	480	9,6	230	4,6	150	3,0	100	2,0
	average	513	10,2	230	4,6	156	3,1	126	2,5
OZ (Trench closure – 1)	I	100	2,0	100	2,0	0	0	0	0
	II	205	4,1	195	3,9	0	0	10	0,2
	III	380	7,6	180	3,6	170	3,4	30	0,6
	average	228	4,5	158	3,2	56	1,1	13	0,2

Table 4 – Phytopathological condition of sugar beet during ion ozone treatment

Name of samples	Recurrence	Losses from diseases		Botrytis cinerea (gray rot)		Phoma betae (phoma blight)		Fusarium spp (fusarium wilt)	
		g	%	g	%	g	%	g	%
Cagat - control	I	1015	20,3	515	10,3	380	7,6	120	2,4
	II	1120	22,4	420	8,4	400	8,0	300	6,0
	III	550	11,0	250	5,0	150	3,0	100	2,0
	average	895	17,9	395	7,9	327	6,6	173	3,4
IOZ (Cagat -1)	I	70	1,4	70	1,4	0	0	0	0
	II	185	3,7	90	1,8	95	1,9	0	0
	III	185	3,7	85	1,7	50	1,0	50	1,0
	average	147	2,9	49	1,0	48	0,9	50	1,0
IOZ (Cagat -2)	I	205	4,1	105	2,1	70	1,4	30	0,6
	II	100	2,0	50	1,0	50	1,0	0	0
	III	320	6,4	120	2,4	130	2,6	70	1,4
	average	208	4,1	92	1,8	83	1,7	33	0,6

Hermetically sealed - control	I	300	6,0	130	2,6	170	3,4	0	0
	II	480	9,6	280	5,6	100	2,0	100	2,0
	III	420	8,4	180	3,6	120	2,4	100	2,0
	average	400	8,0	196	3,9	130	2,8	66	1,3
IOZ (hermetically sealed – 1)	I	370	7,4	170	3,4	150	3,0	50	1,0
	II	250	5,0	150	3,0	100	2,0	0	0
	III	245	4,9	145	2,9	50	1,0	50	0,5
	average	288	5,8	155	3,2	100	2,0	33	0,6
IOZ (hermetically sealed – 2)	I	175	3,4	75	1,5	75	1,5	25	0,5
	II	175	3,4	85	1,7	55	1,1	35	0,7
	III	105	2,1	105	2,1	0	0	0	0
	average	151	3,0	88	1,8	43	0,8	20	0,4
Trench closure - control	I	415	8,3	215	4,3	150	3,0	50	1,0
	II	740	14,8	440	8,8	170	3,4	130	2,6
	III	950	19,0	550	11,0	290	5,8	110	2,2
	average	701	14,0	401	8,1	203	4,0	96	1,9
IOZ (Trench closure – 1)	I	165	3,3	65	1,3	50	1,0	50	1,0
	II	250	5,0	150	3,0	50	1,0	50	1,0
	III	210	4,2	160	3,2	50	1,0	0	0
	average	208	4,1	125	2,5	50	1,0	33	0,6

According to the results of phytopathological assessment of sugar beet from the farm of Merke district with different storage methods, it follows that the incidence of beet diseases in the control variants with all storage methods is higher than with ion ozone treatment. The variant with storage of sugar beet in conditions of pile storage with ion ozone treatment slightly exceeds the other variants.

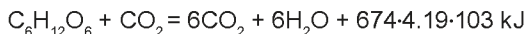
Study of the intensity of respiration of sugar beet with ozone treatment. The intensity of respiration of sugar beet characterizes the physiological processes occurring during long-term storage of sugar beet; natural loss of sugar beet mass is mainly associated with the intensity of respiration. In the case of the pile method of storing sugar beets, the intensity of respiration is mainly aerobic, i.e. with access to oxygen in the air.

In the hermetic method of storing sugar beets in stationary containers, the intensity of respiration changes from aerobic to completely anaerobic respiration.

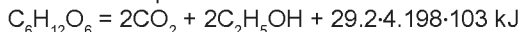
In the trench method of storing sugar beets, the aerobic nature of the respiration begins and the oxygen content in the air decreases, and anaerobic respiration also occurs.

As is known, the intensity of respiration is described by the equation:

Aerobic respiration:



Anaerobic respiration:



During long-term storage of sugar beets, a large amount of carbon dioxide, water and thermal energy is released during aerobic respiration.

All of them affect the storage condition of sugar beets in terms of humidity and temperature, as well as the development of pathogenic microorganisms. During anaerobic respiration of sugar beets, ethyl alcohol, water and thermal energy are formed in small quantities compared to aerobic respiration. The method for determining the intensity of respiration of sugar beets during long-term storage was determined according to those described above in the research methods section. The results of the study on the effect of ozone treatment on the respiration intensity of sugar beet under different storage conditions are presented in Table 5.

Table 5 – Change in respiration intensity of sugar beet with different methods of storage with ozone treatment

No.	Sample names	Repeti- tion	Amount of HCl used for titration ml		a	Average value, a	Respiratory rate (J) mg CO ₂ /kg h
			Investigate				
			by f-fo	by m-or			
	Xn	I	9,9	10,2	0,3	0,3	
		II	9.9	10.2	0.3		

1	Cagat - control	I	8,8	10,4	1,3	1,3	7,15
		II	8,8	10,4	1,3		
2	OZ (Cagat - 1)	I	9,7	10,7	0,65	0,65	4,29
		II	9,7	10,7	0,65		
3	OZ (Cagat - 2)	I	8,9	10,2	1,0	1,0	5,5
		II	8,9	10,2	1,0		
4	Sealed - control	I	8,4	10,2	1,5	1,55	8,5
		II	8,3	10,2	1,6		
5	OZ (Sealed -1)	I	9,0	10,2	0,9	0,75	4,1
		II	9,3	10,2	0,6		
6	OZ (Sealed -2)	I	9,3	10,4	0,8	0,8	4,4
		II	9,3	10,4	0,8		
7	Trench - control	I	8,1	10,1	1,8	1,85	10,1
		II	8,0	10,1	1,9		
8	OZ (Trench -1)	I	8,9	10,3	1,15	1,15	6,32
		II	8,8	10,2	1,15		

It is evident from the data in Table 5 that in the control samples the respiration rate was in the range from 7.15 to 10.1 mg CO₂/kg.hour, with pile storage from 4.29 to 5.5 mg CO₂/kg.hour, hermetically sealed from 4.1 to 4.4 mg CO₂/kg.hour and in trenches at an average level of 6.32 CO₂/kg.hour. The respiration rate of sugar beet with all studied storage methods with ozone treatment is less than the respiration rate under conditions without treatment in the control samples, which is explained by more favorable storage conditions with ozone treatment.

Study of sugar beet respiration intensity during ion ozone treatment. The results of the study of the effect of ion ozone treatment on the respiration intensity of sugar beet under different storage conditions are presented in Table 6.

It is evident from the data in Table 6 that the respiration rate in the control samples was within the range of 8.2 to 12.6 mg CO₂/kg.hour, in a pile from 4.5 to 5.22 mg CO₂/kg.hour, in a sealed container from 4.29 to 4.95 mg CO₂/kg.hour, and in a trench from 7.7 to 12.6 mg CO₂/kg.hour.

The respiration rate of sugar beets in all studied storage methods with ion ozone treatment was less than the respiration rate under conditions without treatment (control variants), which is explained by more favorable storage conditions with ion ozone treatment.

The effect of ozone treatment:

- Treatment with ozone flows significantly reduced the microbial load on the surface of root crops, which led to a decrease in the number of diseased and rotten specimens.
- The weight loss after ozone treatment was 10–15% lower compared to the control group.
- The shelf life of root crops increased by 20–25% with optimal ozone concentration and treatment time.

Efficiency of ion-ozone treatment:

- Ion-ozone treatment was more effective in combating bacterial infections due to the combined action of ions and ozone.
- The number of diseased root crops decreased by 30% compared to untreated samples.
- Weight loss was minimal (5–8%), and shelf life reached 80% after 3 months of storage.

Table 6 – Changes in the intensity of respiration of sugar beet under different storage methods with ion ozone treatment

No.	Sample names	Repetition	Amount of HCl used for titration ml		a	Average value, a	Respiratory rate (J) mg CO ₂ /kg h
			Investigate				
			by f-fo	by m-or			
	X _n	I	9,9	10,2	0,3	0,3	
		II	9,9	10,2	0,3		
		II	8,8	10,2	1,15		
1	Cagat - control	I	8,4	10,2	1,55	1,60	8,8
		II	8,3	10,2	1,65		
2	IOZ (Cagat - 1)	I	10,2	11,3	0,8	0,82	4,5
		II	10,2	11,3	0,8		
3	IOZ (Cagat - 2)	I	9,0	10,2	0,95	0,95	5,22
		II	9,0	10,2	0,95		
4	Sealed - control	I	8,6	10,3	1,4	1,5	8,2
		II	8,5	10,4	1,6		
5	IOZ (Sealed -1)	I	9,7	10,7	0,65	0,65	4,29
		II	9,7	10,7	0,65		
6	IOZ (Sealed -2)	I	8,9	10,1	0,9	0,9	4,95
		II	8,9	10,1	0,9		
7	Trench - control	I	7,65	10,25	2,35	2,30	12,6
		II	7,7	10,25	2,35		
8	IOZ (Trench -1)	I	8,3	10,2	1,7	1,7	7,7
		II	8,3	10,2	1,7		

Conclusion. In general, based on the study of the physiological process occurring in sugar beet during long-term storage based on changes in respiration intensity, it is possible to cancel the importance of its reduction during ozone and ion-ozone treatment, which leads to a decrease in all losses, including natural loss. The use of ozone and ion-ozone flows has shown high efficiency in extending the shelf life of sugar beet. The most significant results have been achieved using ion-ozone treatment, which provides:

- Reduction of phytopathological damage.

- Minimization of quantitative losses.
- Improvement of shelf life and suitability of root crops for processing.

The results of the study have been tested at Koksu Sugar Plant LLP and Merke Sugar Plant LLP.

The introduction of these technologies into agricultural practice will increase the economic efficiency of sugar production by reducing losses at the storage stage and ensuring high quality of raw materials.

References

- 1 Sharipov A.K. Experience of reviving sugar beet production in Kazakhstan and Russia (Text) // Actual issues of economic sciences: materials of the II Intern. scientific conf. (Ufa, April 2013). - Ufa: Leto, 2013. - P. 36-40. (in Russian)
- 2 Methods of storing sugar beets (Electronic resource) // Vuzlit.ru. - URL: https://vuzlit.ru/1737604/rezhimy_sposoby_hraneniya_saharnoy_svekly (date of access: 10.02.2025). (in Russian)
- 3 Sweet problems of Kazakhstan (Electronic resource) // Kazakh-Zerno. — July 13, 2017 — URL: <http://www.kazakh-zerno.kz/novosti/populyarnye-novosti/237380-sladkie-problemy-kazakhstana> (date of access: 10.02.2025). (in Russian)
- 4 Trisvyatsky L. A., Lesik, G. V., Kudrina, V. N. Storage and technology of agricultural products. — Moscow: Agropromizdat, 1991. — 415 p. (in Russian)
- 5 Experience of reviving sugar beet production in Kazakhstan and Russia (Electronic resource) // Moluch.ru. — URL: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/76/3723/> (date of access: 10.02.2025). (in Russian)
- 6 Is it profitable to grow sugar beets in Kazakhstan (Electronic resource) // Inform.kz. — URL: http://www.inform.kz/ru/vygodno-li-vyraschivat-saharnuyu-sveklu-v-kazahstane_a2982838 (date of access: 10.02.2025). (in Russian)
- 7 Storage of sugar beets, storage methods (Electronic resource) // Agroxxi.ru. — URL: <https://www.agroxxi.ru/saharnaja-sv-kla/saharnaja-sv-kla-hranenie/hranenie-saharnoi-svekly-prodolzhenie.html> (date of access: 10.02.2025). (in Russian)
- 8 Kulajanov K. S., Iztaev A. I., Maemerov M. M. Theoretical foundations of the technique and technology of ozone and ion and ion-ozone processing of grain // Information agrotechnologies: abstract of the report of the international scientific and practical seminar. — Almaty, 2009. — P. 90. (in Russian)
- 9 Iztaev A. I., Dautkanova D. R., Dautkanova N. B., Yerbulekova M. T., Toxanbayeva B. O. New Natural Sugar Substitute in Baking Industry // 5-th World Engineering Congress (WEC-2013) «Pakistan Engineering Council at National University of Sciences Technology». — Islamabad, 2013. — P. 6.
- 10 Iztaev A. I., Kulajanov T. K., Maemerov M. M., Assangalieva J. R. Electromagnetic Ion-Ozone Grain Processing // Pakistan Engineering Council at National University of Sciences Technology. 5-th World Engineering Congress (WEC-2013): Proceedings of the International Scientific and Practical Conf.— Islamabad, 2013. — P. 31.
- 11 Stankevich G. N. Compilation of a mathematical description based on experimental data // Mathematical modeling of food production processes: Collection of problems: Textbook; Ed. by N. Ostapchuk V. Kyiv: Vyshchak, 1992. - Chapter 1. - P. 3-59. (in Russian)
- 12 Ostapchuk M. V. Mathematical modeling on EOM: Handbook / M. V. Ostapchuk, G. N. Stankevich. - Odessa: Druk, 2007. - 313 p. (in Ukrainian)

Измаев А.И.¹, Якияева М.А.¹, Жакатаева А.Н.²

¹Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан

²Казахский научно-исследовательский институт земледелия и растениеводства, пос. Алмалыбак, Алматинская область, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ СОХРАНЯЕМОСТИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ПРИ ОЗОННОЙ И ИОНООЗОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования сохраняемости корнеплодов сахарной свеклы после обработки озонными и ионоозонными потоками. Целью исследования являлось продление срока хранения сырья сахарного производства за счет антибактериальной обработки и минимизации потерь. Применялись инновационные технологии озоновой и ионоозонной обработки, направленные на уничтожение патогенной микрофлоры и предотвращение гниения. Озон (O_3) обладает дезинфицирующими свойствами, уничтожая бактерии, споры плесени и грибов. Ионоозонные потоки, сочетая озон и отрицательно заряженные ионы, усиливают антибактериальный эффект. В ходе эксперимента оценивались интенсивность дыхания корнеплодов, динамика метаболических процессов и степень воздействия озона и ионоозона. Проведен анализ количественных изменений продукции, включая: убыль массы; количество пораженных корнеплодов; степень механических повреждений; общие потери (усушка, гниль, плесень); процент сохраняемости качественных корнеплодов. Фитопатологическая оценка выявила снижение пораженности болезнями. Результаты подтвердили, что обработка озоном и ионоозоном снижает потери и продлевает срок хранения, сохраняя товарный вид и вкусовые качества. Это подтверждает перспективность технологии для сахарной промышленности как эффективного и экологически безопасного метода хранения сырья.

Ключевые слова: сахарная свекла, хранение, озон, ионоозон, обработка.

* * *

Измаев А.И.¹, Якияева М.А.¹, Жакатаева А.Н.²

¹Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Қазақ егіншілік және өсімдік шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты, Алмалыбак ауылы, Алматы облысы, Қазақстан

ОЗОН ЖӘНЕ ИОНОЗОНДЫ ӨНДЕУ АЛДЫНДА ҚАНТ ҚЫЗЫЛШАСЫНЫҢ САҚТАУ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

Түйіндіме. Мақалада қант қызылшасының түйнектерін озонды және ионоозонды ағындармен өндегеннен кейінгі сақталу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің мақсаты – шикізатты бактерияға қарсы өндеу және сақтау кезіндегі шығындарды азайту арқылы қант өндірісінің негізгі шикізатының сақталу мерзімін ұзарту. Патогендік микрофлораны жою және шіру процестерінің алдын алу үшін озонды және ионоозонды өндеудің инновациялық технологиялары қолданылды. Озон (O_3) бактерияларды, көгеру спораларын және зәңдерді жоятын күшті дезинфекциялық қасиеттерге ие. Ионоозонды ағындар озон мен теріс зарядталған иондарды біріктіре отырып, бактерияға қарсы әсерін күшейтеді. Эксперимент барысында түйнектердің тыныс алу қарқындылығы, метаболиттік процестердің динамикасы және озон мен ионоозонның әсер ету деңгейі баға-

ланды. Өнімнің сандық өзгерістері талданып, салмақтың кемуі, зақымдалған түйнектер саны, механикалық зақымдану дәрежесі, жалпы шығындар (кебу, шіру, зең), сапалы түйнектердің сақталу пайызы көрсеткіштері зерттелді. Фитопатологиялық бағалау барысында аурулардың таралуының төмендегені байқалды. Зерттеу нәтижелері озон және ионоозонмен өңдеу әдістерінің шикізаттың массалық жоғалуын азайтып, сақтау мерзімін ұзартуға мүмкіндік беретінін дәлелдеді. Зерттеу барысында өңделген түйнектер ұзақ уақыт бойы тауарлық түрін және дәмдік қасиеттерін сақтап қалды. Бұл әдістің қант өнеркәсібі үшін тиімді және экологиялық қауіпсіз сақтау технологиясы ретінде болшағы зор екенін растайды.

Түйінді сөздер: Қант қызылшасы, сақтау, озон, ионоозон, өңдеу.

Information about the authors

Iztayev Auyelbek – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, yamadina88@mail.ru

Yakiyayeva Madina – PhD, Associate Professor, Corresponding Member of the National Academy of Agrarian Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, yamadina88@mail.ru

Zhakatayeva Altynay – PhD, Kazakh Research Institute of Agriculture and Plant Growing, Almalymbak settlement, Almaty Region, Kazakhstan, yamadina88@mail.ru

Авторлар туралы мәліметтер

Измаев Аюелбек Измаевич – Техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, yamadina88@mail.ru

Якияева Мадина Асатуллаевна – PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҰАҒА корреспондент-мүшесі, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, yamadina88@mail.ru

Жакатаева Алтынай Насыпкановна – PhD, Қазақ егіншілік және өсімдік шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты, Алмалыбақ а., Алматы облысы, Қазақстан, yamadina88@mail.ru

Сведения об авторах

Измаев Аюелбек Измаевич – доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан, yamadina88@mail.ru

Якияева Мадина Асатуллаевна – PhD, ассоциированный профессор, член-корреспондент НААН РК, Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан, yamadina88@mail.ru

Жакатаева Алтынай Насыпкановна – PhD, Казахский научно-исследовательский институт земледелия и растениеводства, п. Алмалыбак, Алматинская область, Казахстан, yamadina88@mail.ru

ПЕРЕВОД СТАТЬИ / МАҚАЛАНЫҢ АУДАРМАСЫ

Измаев А.И.¹, Якияева М.А.¹, Жакатаева А.Н.²

¹Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан

²Казахский научно-исследовательский институт земледелия и растениеводства, п. Алмалыбак, Алматинская область, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ СОХРАНЯЕМОСТИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ПРИ ОЗОННОЙ И ИОНООЗОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования сохраняемости корнеплодов сахарной свеклы после обработки озонными и ионоозонными потоками. Цель исследования - продление срока хранения сырья сахарного производства за счет антибактериальной обработки и минимизации потерь. Применялись инновационные технологии озонной и ионоозонной обработки, направленные на уничтожение патогенной микрофлоры и предотвращение гниения. Озон (O_3) обладает дезинфицирующими свойствами, уничтожая бактерии, споры плесени и грибов. Ионоозонные потоки, сочетая озон и отрицательно заряженные ионы, усиливают антибактериальный эффект. В ходе эксперимента оценивались интенсивность дыхания корнеплодов, динамика метаболических процессов и степень воздействия озона и ионоозона. Проведен анализ количественных изменений продукции, включая: убыль массы; количество пораженных корнеплодов; степень механических повреждений; общие потери (усушка, гниль, плесень); процент сохраняемости качественных корнеплодов. Фитопатологическая оценка выявила снижение пораженности болезнями. Результаты подтвердили, что обработка озоном и ионоозоном снижает потери и продлевает срок хранения, сохраняя товарный вид и вкусовые качества. Это подтверждает перспективность технологии для сахарной промышленности как эффективного и экологически безопасного метода хранения сырья.

Ключевые слова: сахарная свекла, хранение сахарной свеклы, озонная обработка, ионоозон, обработка.

Введение. Сахарную свеклу принимают партиями. Партией считают любое количество свеклы, доставленное в одной транспортной единице и оформленное одним документом. До взвешивания свеклу осматривает контроль и, исходя из ее физического состояния, спелости, общей загрязненности и данных предуборочного химико-фитопатологического обследования посевов, распределяет по срокам хранения [1-2].

Современная прогрессивная технология приемки и хранения корнеплодов сахарной свеклы, убранный комбайном, предусматривает выполнение следующих важнейших мероприятий: предуборочное массовое химико-фитопатологическое обследование посевов свеклы; приемку свеклы в строгом соответствии с требованиями ГОСТ 17421; распределение свеклы на категории по срокам хранения и переработки; доочистку свеклы от примесей перед укладкой в кагаты; применение химических препаратов для обработки свеклы, укладываемой на хранение; вентилирование кагатов увлажненным воздухом; использование автоматизированных средств контроля и регулирования

ния температурного режима; защиту свеклы от увядания и подмораживания (нанесение на поверхность кагатов слоя известкового молока и укрытие их теплоизоляционными материалами); использование сплавных площадок, оборудованных системами активного вентилирования для краткосрочного хранения свеклы и подачи ее на переработку; применение механизмов для подачи свеклы из кагатов на переработку, обеспечивающих минимальные потери свекломассы и сахара [3-4].

Свекла, доставляемая с полей в автомашинах с бортами, разгружается и укладывается в кагаты: на кагатных полях – с помощью мобильных свеклоукладчиков, на механизированных складах и площадках с твердым покрытием с помощью фронтальных свеклоукладчиков на пневмоколесном ходу или рельсовых [5-6].

При правильно проведенном замораживании свеклы дыхание и все процессы обмена в корнеплодах прекращаются. Химический состав и технологические качества замороженной и свежей свеклы практически одинаковы.

Ферменты при замораживании не инактивируются. При оттаивании же корнеплодов их активность восстанавливается, что подтверждается почернением свекловичной ткани и быстрым гидролизом сахарозы [7-8].

Установлено также, что хорошо хранится свежевыкопанная, неподвяленная мытая свекла с содержанием сильно травмированных корнеплодов не более 15 % и зеленой массы не более 3 %. Подвяленные корнеплоды после мойки хранятся хуже, чем невымытые.

Успех хранения во многом зависит от газового состава кагатного воздуха, в частности соотношения углекислого газа и кислорода. Наиболее благоприятные условия для хранения маточных корнеплодов создаются, если в кагатном воздухе кислорода содержится 12-14 %, углекислого газа — около 5 %. При хранении маточных корнеплодов свеклы в условиях повышенной концентрации углекислого газа не только наблюдаются потери массы и сахара (в связи с более интенсивным дыханием), и тем больше, чем больше в хранилище углекислоты, но и снижается семенная их продуктивность. В опытах Н. И. Корженко (ВНИС) при хранении маточных корнеплодов в течение месяца в хранилище, где концентрация углекислого газа составляла около 60%, они потеряли способность к прорастанию. Гибель центральной почки наблюдалась у 16,3% при хранении в течение 20 дней и у 30% при хранении 30 дней без доступа воздуха в хранилище. Средний урожай семян с одного растения был 90 и 75 г, а при хранении без доступа воздуха в течение 10 дней — 123 г. При отсутствии аэрации, что может быть в кагатах со свеклой, накопление углекислого газа быстро возрастает. Имеет значение и температура в хранилище. Если она в пределах 0°, 2°C, то углекислый газ накапливается постепенно и соответственно уменьшается содержание кислорода в хранилищах. Если температура 8°C и выше, то количество углекислого газа уже на пятый день может быть 25-30 %, если нет доступа воздуха в хранилище. Отсюда следует практический вывод, что длительное хранение маточных корнеплодов в кагатах, где нарушена аэрация, неизбежно приводит к потерям хранимых корнеплодов, и к снижению их семенной продуктивности [9-10].

Газовый состав воздуха в хранилище может изменяться и в зависимости от степени загрязненности свеклы. Приставшая грязь закупоривает по-

верхность корнеплодов и промежутки между ними, что затрудняет аэрацию, повышает температуру, в результате повышается активность микроорганизмов и интенсивность дыхания.

Для нормального хранения свеклы вредно избыточное количество не только углекислоты, но и кислорода. Снижение уровня кислорода в среде повышает холодостойкость, обогащение среды углекислым газом ослабляет дыхание свеклы, а обогащение кислородом стимулирует дыхание. Хорошее хранение свеклы требует умеренного дыхания. Значительное количество углекислоты, образуемое в ходе дыхания, удерживается корнеплодами, а если дать свежий воздух, то углекислота сразу же освобождается. Надо учитывать, что главный возбудитель кагатной гнили — грибок *Ботритиссинереа* — аэроб, поэтому приток кислорода может стимулировать его развитие [11-12].

Меры предупреждения нарушения нормального газового состава воздуха в хранилище: соблюдать рекомендации по глубине траншей и высоте укрытия кагатов; не допускать повышенного увлажнения почвы и сильного загрязнения свеклы, не выделять под кагатное поле участки с блюдцами, с высоким уровнем грунтовых вод, на сильно заплывающих почвах; весной не задерживать выемку корнеплодов после снятия земляного укрытия.

Методы исследования. В ходе эксперимента сахарная свекла подвергалась обработке озонными и ионоозонными потоками в различных режимах, которые различались:

- Концентрацией озона (в зависимости от типа обработки);
- Продолжительностью воздействия (временные интервалы обработки);
- Температурными условиями хранения после обработки.

Оценка эффективности обработки включала в себя комплексное изучение состояния корнеплодов на разных этапах хранения. Были проведены следующие анализы:

1. Определение интенсивности дыхания – измерение выделения углекислого газа для оценки метаболической активности корнеплодов. Высокая интенсивность дыхания свидетельствует об ускоренных процессах разложения и снижении сохраняемости.

2. Количественный анализ сохраненной продукции – взвешивание и учет массы продукции на разных этапах хранения для выявления динамики потерь.

3. Фитопатологическая оценка корнеплодов – изучение наличия и распространности грибковых и бактериальных заболеваний, оценка степени поражения и выявление патологических изменений.

Определение интенсивности дыхания. При проведении всевозможных исследований с хранением клубней или овощей удобным является способ определения дыхания в герметично закрытых эксикаторах. Сущность метода состоит в том, что выделяемая углекислота поглощается едким натрием с образованием углекислых соли, количество которой рассчитывается по разнице титрования полученного раствора в присутствии фенолфталеина и метилоранжа.

Эксикатора должны закрываться герметично. Проверяют герметичность эксикаторов следующим образом: в подготовленный сухой эксикатор кладут

подожжённую бумагу и закрывают, если через сутки эксикатор сохраняет вакуум, то он герметичен, его можно использовать для опыта.

Размер эксикатора зависит от величины пробы и продолжительности опыта. Расчёт должен быть такой, чтобы к концу опыта навеской было использовано около половины кислорода, заключённого в эксикаторе. Для обеспечения герметичности крышки эксикатора промазывают вазелином или смазкой. Для опыта необходимы 0,5 н растворы HCl и NaOH, а также растворы индикаторов фенолфталеина и метилоранжа.

Обычно берется средняя проба овощей 0,5-1 кг клубней. Каждое определение проводится в 2,3 кратной повторности, для чего готовят соответствующее количество типичных и одинаковых проб. На дно эксикатора в чашке Петри помещают 50 мл 0,5 н щёлочь (интенсивность дыхания не превышает 10 мг CO₂ в час, а навеске 0,5 кг). Эту операцию нужно проводить как можно быстрее, чтобы щелочь поглотила меньше CO₂ из воздуха. Одновременно ставят такие же эксикаторы, но без овощей (контроль для щелочь).

Клубни или овощи над щёлочью выдерживают обычно 12-24 часа. Для получения сравнимых данных, определение необходимо проводить при одинаковой температуре, так как интенсивность дыхания сильно зависит от температуры. В подготовленные эксикаторы с щелочью на подставки вкладывают поочередно помещают пробы с таким расчетом, чтобы корнеплоды не касались щелочи, а в щёлочь не попадала грязь. Вынимают пробы в том же порядке, в каком закладывали. Щелочь выливают в колбы и плотно их закрывают. На титрование берётся 10 мл щелочи в 2 кратной повторности: если данные параллельных титрований не совпадают, то число повторных титрований увеличивают. Титрование проводят 0,5 н соляной кислотой сначала в присутствии 1-2 капель фенолфталеина до обесцвечивания, а затем с добавлением метилоранжа (1-2 капли) до изменения окраски.

Интенсивность дыхания определяется количеством углекислоты, выделяемой (мг) 1 кг овощей за 1 час преопределённой температуре (учитывается в каждом отдельном случае).

$$x = \frac{a \cdot 2 \cdot k \cdot 11 A}{T \cdot P \cdot B}$$

где:

a – разница титрований по фенолфталеину и метилоранжу (за вычетом разницы титрования контроле на щелочь), мл

k – поправка к титру кислоты.

A – объем щелочи, помещанной в эксикаторе, мл

B – объем щелочи, взятый на титрования, мл

T – время экспозиции, час.

P – вес пробы, кг.

$$\text{Интенсивность дыхания сахарной свеклы} - J = \frac{a \cdot k \cdot 5.5 A}{T \cdot P \cdot B}$$

где:

a – разница титрований по фенолфталеину и метилоранжу (за вычетом разницы титрования контроле на щелочь) – мл (х.п)

A – объем щелочи, помещенной в эксикаторе, 50 мл

B – объем щелочи взятый на титрования, 10 мл

T – время экспозиции, 5 ч.

P – вес пробы, 1 кг

5,5 – коэффициент пересчёта мл NaOH усвоенного CO₂ на мг CO₂

На 1 мл 0,1 н раствора щелочи идет 2,2 мг CO₂, а на 1 мл 0,25 н раствора щелочи идет:

0,1 н - 2,2 мг CO₂

0,25 н х

$$x = \frac{0,25 \cdot 2,2}{0,1} = 5,5$$

к – поправка к титру кислоты

$k = \frac{\text{мл щелочи}}{\text{мл кислоты}}$ пошедшее на титрование по фенолфталеину

$k = \frac{(10 \text{ мл NaOH})}{(10 \text{ мл HCl})} = 1$ На 10 мл 0,25 н NaOH пошло 10 мл 0,25 н HCl

$$J = \frac{a \cdot k \cdot 5.5 \cdot A}{T \cdot P \cdot B} = \frac{a \cdot 1 \cdot 5.5 \cdot 50}{5 \cdot 1 \cdot 10} = a \cdot 5.5$$

Методика исследований по хранению корнеплодов. Для длительного хранения корнеплоды выращивают на плодородных почвах. Урожай должен быть выращен при соблюдении основных требований агротехники: при ведении севооборотов, при рациональном применении удобрений, пестицидов и орошения. В почве не должно быть возбудителей болезней, особенно фомоза и серая гнили. Для посева используют чистосортные семена одной партии.

В процессе хранения анализировались следующие параметры:

- Убыль массы – количественные потери массы корнеплодов из-за испарения влаги и метаболической активности.
- Количество больных корнеплодов – доля корнеплодов, пораженных фитопатогенами (гнили, плесень и бактериальные инфекции).
- Механические повреждения – оценка внешних дефектов и травм, возникших при сборе и транспортировке.
- Общие потери – совокупность всех форм утрат, включая естественную убыль, повреждения и поражение заболеваниями.
- Сохраняемость – процент здоровых и пригодных к дальнейшей переработке корнеплодов через определенные интервалы хранения.

Убирать урожай и отбирать урожай на хранение необходимо до наступления заморозков. Опытную продукцию следует свезти в день уборки на постоянное место хранения, чтобы корнеплоды не утратили часть влаги и не поглотили ее из влажного воздуха, что может сказаться на сохраняемости. После завоза корнеплодов в хранилище следует выдержать их несколько

дней для выравнивания по тургорного состояния. Все варианты одного опыта должны быть заложены в течение одного дня. Закладывают в опыт только здоровые, чистые, сухие, не поврежденные вредителями и болезнями, без механических повреждений, не подвявшие корнеплоды средних размеров, характерные для сорта и урожая данного года. Заложенные корнеплоды должны соответствовать требованиям ГОСТа Разница в размерах корнеплодов сказывается на интенсивности дыхания, испарении влаги, химическом составе, механической прочности и др. показателях. Различия в убыли массы могут быть большими, поэтому следует закладывать корнеплоды средних размеров и одинаковых в различных вариантах.

Масса учетного образца для овощей со средними и крупными корнеплодами, число повторений – не менее 3. Обязательным должен быть элемент сравнения, поэтому одним из вариантов должен быть контроль (стандарт). Один контроль должен приходиться на 10-12 вариантов.

Схема однофакторного опыта должна быть построена с соблюдением принципа единственного различия, при тождестве прочих условий.

В хранилище для хранения корнеплодов необходимо в возможно короткий срок довести температуру до оптимальной. В местах расположения всех вариантов опыта, включая контрольный должен быть создан одинаковый оптимальный режим хранения. Рекомендуется хранить при температуре 0°C с колебаниями в пределах от -0,5 до +1°C при относительной влажности воздуха 95-98%. Свеклу – при температуре +1°C, не ниже 0, при относительной влажности воздуха – не выше 95%.

При снятии образцов с хранения проводится полный анализ количественных изменений сохранившейся продукции и фитопатологическая оценка:

- убыль массы (потери от дыхания и испарения), определяется разницей в весе учетного образца при закладке на хранение и снятия после длительного хранения;
- выход полноценных корнеплодов, определяется взвешиванием сохранившейся полноценной продукции;
- абсолютный отход, определяется взвешиванием непригодной к употреблению продукции и определяется его отношение к весу заложенного образца;
- количество больных корнеплодов (отбирается продукция, пораженная болезнями с учетом видов болезней);
- другие потери (подмороженные, вялые) учитываются отдельно или в совокупности с другими отходами или как абсолютный отход;
- проросшие корнеплоды характеризуют степень выхода из состояния покоя. Определяется процент проросших корнеплодов в учетном образце;
- общие потери, складываются из убыли массы и абсолютного отхода.

Результаты учетов выражают в процентах к массе корнеплодов, заложенных на хранение.

Для определения качественных изменений при хранении изучают биохимический состав. Биохимические анализы проводят по общепринятым методикам перед закладкой корнеплодов на хранение и после него. Определяют изменения сухого вещества, сахаров, витамина С, каротина. Проба для хими-

ческого анализа должна состоять не менее, чем из 10 корнеплодов и полностью представлять средний образец от варианта опыта. Анализ проводят в день взятия пробы. Анализируют корнеплоды без зачистки покровных тканей.

Результаты и обсуждение. *Сохраняемость сахарной свеклы хозяйства Коксуского района при озонной обработке.* Сохраняемость сахарной свеклы характеризуется уровнем не потерянной массы при выемке этой массы, выражаемым в процентном соотношении. Потери общей массы сахарной свеклы складывается из следующих характеристик - естественной убыли (%), больных клубней (%), механических повреждений (%).

В данном случае, в хозяйстве Коксуского района Алматинской области, проведены исследования по определению сохраняемости сахарной свеклы с вычетом общей потери массы, которые определялись в трёх параметрах по разным способам длительного хранения при озонной обработке.

Результаты исследования сохраняемости сахарной свеклы приведена в таблице 1.

По результатам оценки сохраняемости сахарной свеклы из хозяйства Коксуского района, хранящейся при различных способах хранения отмечено, что все варианты с обработкой озоном при кагатном, герметичном и траншейном способах хранения превышают по сохраняемости контрольные варианты. Сохраняемость сахарной свеклы в условиях герметичного хранения с обработкой озоном превышает остальные способы хранения.

Сохраняемость сахарной свеклы Меркенского сахарного завода, обработанной ионоозонным потоком. Аналогичным образом, проведены исследование по определению сохраняемости сахарной свеклы разным способом хранения (кагатное, герметичное и траншейное) с ионоозонной обработкой в трех повторностях. Были также определены следующие потери: естественная убыль (%), больные клубники (%) механическое повреждение (%), суммируя их установлены общие потери, массы, которые позволили установить сохраняемость сахарной свеклы при разных способах хранения.

Результаты исследования по определению сохраняемости сахарной свеклы при разных способах длительного хранения, приведены в таблице 2.

По результатам оценки сохраняемости сахарной свеклы из хозяйства Меркенского района, хранящейся при различных способах хранения отмечено, что все варианты с обработкой ионоозоном при кагатном, герметичном и траншейном способах хранения превышают по сохраняемости контрольные варианты. Сохраняемость сахарной свеклы в условиях герметичного хранения с обработкой ионоозоном превышает остальные варианты.

Фитопатологическая оценка сахарной свеклы урожая из хозяйства Коксуского района с озонной обработкой. Количественно-качественные потери сахарной свеклы при длительном хранении происходит в основном от болезни, вызванные болезнетворными микроорганизмами такие как серая гниль (*Botrytis cinerea*), фомоз (*Phoma betae*) и фузариозы (*Fusarium* spp). Установления потери сахарной свеклы от приведённых видов болезни позволяет провести фитопатологическую оценки состояние сахарной свеклы при длительном хранении.

Таблица-1 – Изменение показателя сохраняемости сахарной свеклы при длительном хранении разными способами при озонной обработке

Название образца	Повторность	Масса при выемке, г	Убыль массы		Больные		Механические повреждения		Общие потери		Сохраняемость	
			г	%	г	%	г	%	г	%	г	%
Кагат-контрольный	I	4565	435	8,7	300	6,0	0	0	735	14,7	4265	85,3
	II	4630	370	7,4	285	5,7	0	0	655	13,1	4345	87,0
	III	4600	400	8,0	275	5,5	0	0	675	13,5	4325	86,5
	Cp	4598	401	8,0	287	5,7	0	0	689	13,8	4311	86,2
ОЗ (кагат-1)	I	4710	290	5,8	230	4,6	30	0,6	550	11,0	4450	89,0
	II	4685	315	6,3	205	4,1	20	0,4	540	10,8	4460	89,2
	III	4645	355	7,1	150	3,0	0	0	505	10,1	4495	90,0
	Cp	4680	320	6,4	195	3,9	17	0,3	532	10,6	4468	89,3
ОЗ (кагат-2)	I	4705	295	5,9	150	3,0	0	0	445	8,9	4555	91,1
	II	4705	295	5,9	170	3,4	0	0	465	9,3	4535	90,7
	III	4675	325	6,5	190	3,8	0	0	515	10,3	4485	89,7
	Cp	4695	305	6,1	170	3,4	0	0	475	9,5	4525	90,5
Герметичное – контрольный	I	4565	435	8,7	390	7,8	0	0	825	16,5	4175	83,5
	II	4565	435	8,7	370	7,4	70	1,4	875	17,5	4125	82,5
	III	4560	440	8,8	420	8,4	10	0,2	870	17,4	4130	82,6
	Cp	4763	437	8,7	393	7,8	26	0,5	856	17,1	4144	82,9
ОЗ (герметичное – 1)	I	4800	200	4,0	240	4,8	0	0	440	8,8	4560	91,2
	II	4780	220	4,4	180	3,6	0	0	400	8,0	4600	92,0
	III	4750	250	5,0	90	1,8	0	0	340	6,8	4660	93,2
	Cp	4778	223	4,5	170	3,4	0	0	393	7,8	4607	92,1

ОЗ (герметичное – 2)	I	4850	150	3,0	100	2,0	0	0	250	5,0	4750	95,0
	II	4820	180	3,6	90	1,8	0	0	270	5,4	4730	94,6
	III	4810	190	3,8	70	1,4	0	0	260	5,2	4740	94,8
	Ср	4827	173	3,5	86	1,7	0	0	259	5,1	4741	94,8
Траншей.– кон- трольный	I	4612	388	7,7	590	11,8	20	0,4	998	19,9	4002	80,0
	II	4515	485	9,7	470	9,4	0	0	955	19,1	4045	80,9
	III	4525	475	9,5	480	9,6	0	0	955	19,1	4045	80,9
	Ср	4551	449	9,0	513	10,2	6	0,1	968	19,3	4032	80,6
ОЗ (траншейное – 1)	I	4625	375	7,5	100	2,0	0	0	475	9,5	4525	90,5
	II	4735	265	5,3	205	4,1	30	0,6	500	10,0	4500	90,0
	III	4595	405	8,1	380	7,6	0	0	785	15,7	4215	84,3
	Ср	4652	348	6,9	228	4,5	10	0,2	586	11,7	4414	88,2

Таблица-2 – Изменение показателя сохраняемости сахарной свеклы при длительном хранении разными способом с ионоозонной обработкой

Название образ- цы	Повтор- ность	Масса при вы- емке, г	Убыль массы		Больные		Механическая повреждения		Общие потери		Сохраняемость	
			г	%	г	%	г	%	г	%	г	%
Кагат- контрольный	I	4700	300	6,0	1015	20,3	0	0	1315	26,3	3685	73,7
	II	4465	535	10,7	1120	22,4	0	0	1655	33,1	3345	66,9
	III	4505	495	9,9	550	11,0	0	0	1045	20,9	3955	79,1
	Ср	4557	443	8,8	895	17,9	0	0	1338	26,7	3662	73,2
ИОЗ (кагат- 1)	I	4600	400	8,0	70	1,4	0	0	470	9,4	4530	90,6
	II	4715	285	5,7	185	3,7	0	0	470	9,4	4530	90,6
	III	4735	265	5,3	185	3,7	70	1,4	520	10,4	4480	89,6
	Ср	4683	317	6,3	147	2,9	23	0,4	487	9,7	4513	90,2

ИОЗ (кагат- 2)	I	4690	310	6,2	205	4,1	0	0	515	10,3	4485	89,7
	II	4670	330	6,6	100	2,0	0	0	430	8,6	4570	91,4
	III	4710	290	5,8	320	6,4	0	0	610	12,2	4390	87,8
	Cp	4690	310	6,2	208	4,8	0	0	518	10,4	4482	89,6
Герметичное – контрольный	I	4550	450	9,0	300	6,0	20	0,4	770	15,4	4230	84,6
	II	4630	370	7,4	480	9,6	10	0,2	860	17,2	4140	82,8
	III	4585	415	8,3	420	8,4	0	0	835	16,7	4165	83,3
	Cp	4588	412	8,2	400	8,0	10	0,2	822	16,4	4178	83,5
ИОЗ (герметич- ное – 1)	I	4860	140	2,8	370	7,4	0	0	510	10,2	4490	89,8
	II	4845	155	3,1	250	5,0	0	0	405	8,1	4595	91,9
	III	4790	210	4,2	245	4,9	0	0	455	9,1	4545	90,9
	Cp	4831	169	3,3	288	5,8	0	0	457	9,1	4543	90,8
ИОЗ (герметич- ное – 2)	I	4715	285	5,7	175	3,4	15	0,3	475	9,5	4525	90,5
	II	4735	265	5,3	175	3,4	20	0,4	460	9,2	4540	90,8
	III	4715	285	5,7	105	2,1	0	0	390	7,8	4610	92,2
	Cp	4722	278	5,5	151	3,0	11	0,2	440	8,8	4560	91,2
Траншейное – контрольный	I	4630	370	7,4	415	8,3	0	0	785	15,7	4215	84,3
	II	4465	535	10,7	740	14,8	0	0	1275	25,5	3725	74,5
	III	4535	465	9,3	950	19,0	30	0,6	1415	28,3	3585	71,7
	Cp	4544	456	9,1	701	14,0	10	0,2	1157	23,1	3843	76,8
ИОЗ (траншей- ное – 1)	I	4650	350	7,0	165	3,3	0	0	515	10,3	4485	89,7
	II	4585	415	8,3	250	5,0	0	0	665	13,3	4335	86,7
	III	4645	355	7,1	210	4,2	0	0	565	11,3	4435	88,7
	Cp	4627	373	7,5	208	4,1	0	0	581	11,6	4419	88,4

В этой связи большой научно-практический интерес представляет, влияние озонной обработки на изменение содержание указанных видов болезни корнеплодов сахарной свеклы.

Результаты исследования, по фитопатологической оценке, сахарной свеклы из хозяйства Коксуского района с озонной обработкой приведены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 видно, что общей потери от болезни сахарной свеклы в контрольных образцах составляет от 5,7 % до 10,2 %, при кагатном хранении от 3,4 % до 3,9 %, при герметичном от 1,7 % до 3,4%, при траншейном от 3,0 % до 4,5 %. Самая большие потери приходится к серой гнили от 1,6 % до 4,6 %, затем фомоз и фузариозы.

По результатам фитопатологической оценки сахарной свеклы из хозяйства Коксуского района при разных способах хранения следует, что пораженность свеклы болезнями в контрольных вариантах при всех способах хранения выше, чем с обработкой озоном. Следует отметить более низкое поражение болезнями в условиях герметичного способа хранения с обработкой озоном.

Фитопатологическая оценка сахарной свеклы из хозяйства Меркенского района при ионоозонной обработке. Авторами были проведены экспериментальные исследования по установлению влияние ионоозонной обработки на состояние общей болезни и по отдельным видам: серая гниль, фомоз и фузариозы сахарной свеклы.

Результаты исследования по фитопатологической оценке состояния сахарной свеклы из хозяйства Меркенского района приведены в таблице 4.

Из данных таблицы 4 видно, что общие потери от (min) до (max), в том числе серая гниль от 1,0 до 8,1%, фомоз от 0,8% до 6,6% и фузариозы от 0,4 % до 3,4%.

По результатам фитопатологической оценки сахарной свеклы из хозяйства Меркенского района при разных способах хранения следует, что пораженность свеклы болезнями в контрольных вариантах при всех способах хранения выше, чем с обработкой ионоозоном. Вариант с хранением сахарной свеклы в условиях кагатного хранения с обработкой ионоозоном незначительно превышает остальные варианты.

Таблица-3 – Фитопатологическое состояние сахарной свеклы по болезням при озонной обработке

Название образцы	Повторность	Потери от болезней		Botrytis cinerea (серая гниль)		Phoma betae (фомоз)		Fusarium spp (фузариозы)	
		г	%	г	%	г	%	г	%
ОЗ (кагат-контрольный)	I	300	6,0	170	3,4	75	1,5	65	1,3
	II	285	5,7	190	3,8	0	0	95	1,9
	III	275	5,5	100	2,0	105	2,1	70	1,4
	Ср	287	5,7	153	3,0	60	1,2	76	1,5
ОЗ (кагат-1)	I	230	4,6	110	2,2	60	1,2	60	1,2
	II	205	4,1	80	1,6	70	1,4	55	1,1
	III	150	3,0	70	1,4	80	1,6	0	0
	Ср	195	3,9	86	1,7	70	1,5	38	0,7

ОЗ (кагат-2)	I	150	3,0	60	1,2	60	1,2	20	0,4
	II	170	3,4	80	1,6	50	0,5	40	0,8
	III	190	3,8	100	2,0	45	0,9	45	0,9
	Ср	170	3,4	80	1,6	51	1,1	35	0,6
ОЗ (герметичный-контрольный)	I	390	7,8	180	3,6	110	2,2	100	2,0
	II	370	7,4	120	2,4	130	2,6	120	2,4
	III	420	8,4	190	3,8	120	2,4	110	2,2
	Ср	393	7,8	163	3,2	120	2,4	110	2,2
ОЗ (герметичное – 1)	I	240	4,8	90	1,8	150	3,0	0	0
	II	180	3,6	80	1,6	50	0,5	50	0,5
	III	90	1,8	90	1,8	0	0	0	0
	Ср	170	3,4	86	1,7	66	1,4	16	0,3
ОЗ (герметичное – 2)	I	100	2,0	100	2,0	0	0	0	0
	II	90	1,8	45	0,9	45	0,9	0	0
	III	70	1,4	30	0,6	0	0	40	0,8
	Ср	86	1,7	58	1,2	15	0,3	13	0,2
ОЗ (траншейный-контрольный)	I	590	11,8	290	5,8	150	3,0	150	3,0
	II	470	9,4	170	3,4	170	3,4	130	2,6
	III	480	9,6	230	4,6	150	3,0	100	2,0
	Ср	513	10,2	230	4,6	156	3,1	126	2,5
ОЗ (траншейное – 1)	I	100	2,0	100	2,0	0	0	0	0
	II	205	4,1	195	3,9	0	0	10	0,2
	III	380	7,6	180	3,6	170	3,4	30	0,6
	Ср	228	4,5	158	3,2	56	1,1	13	0,2

Таблица 4 – Фитопатологическое состояние сахарной свеклы при ионоозонной обработке

Название образцы	Повторность	Потери от болезней		Botrytis cinerea (серая гниль)		Phoma betae (фомоз)		Fusarium spp (фузариозы)	
		г	%	г	%	г	%	г	%
Кагат-контрольный	I	1015	20,3	515	10,3	380	7,6	120	2,4
	II	1120	22,4	420	8,4	400	8,0	300	6,0
	III	550	11,0	250	5,0	150	3,0	100	2,0
	Ср	895	17,9	395	7,9	327	6,6	173	3,4
ИОЗ (кагат- 1)	I	70	1,4	70	1,4	0	0	0	0
	II	185	3,7	90	1,8	95	1,9	0	0
	III	185	3,7	85	1,7	50	1,0	50	1,0
	Ср	147	2,9	49	1,0	48	0,9	50	1,0
ИОЗ (кагат- 2)	I	205	4,1	105	2,1	70	1,4	30	0,6
	II	100	2,0	50	1,0	50	1,0	0	0
	III	320	6,4	120	2,4	130	2,6	70	1,4
	Ср	208	4,1	92	1,8	83	1,7	33	0,6

Герметичный – контрольный	I	300	6,0	130	2,6	170	3,4	0	0
	II	480	9,6	280	5,6	100	2,0	100	2,0
	III	420	8,4	180	3,6	120	2,4	100	2,0
	Ср	400	8,0	196	3,9	130	2,8	66	1,3
ИОЗ (герметичное – 1)	I	370	7,4	170	3,4	150	3,0	50	1,0
	II	250	5,0	150	3,0	100	2,0	0	0
	III	245	4,9	145	2,9	50	1,0	50	0,5
	Ср	288	5,8	155	3,2	100	2,0	33	0,6
ОЗ (герметичное – 2)	I	175	3,4	75	1,5	75	1,5	25	0,5
	II	175	3,4	85	1,7	55	1,1	35	0,7
	III	105	2,1	105	2,1	0	0	0	0
	Ср	151	3,0	88	1,8	43	0,8	20	0,4
Траншейный – контрольный	I	415	8,3	215	4,3	150	3,0	50	1,0
	II	740	14,8	440	8,8	170	3,4	130	2,6
	III	950	19,0	550	11,0	290	5,8	110	2,2
	Ср	701	14,0	401	8,1	203	4,0	96	1,9
ИОЗ (траншейное – 1)	I	165	3,3	65	1,3	50	1,0	50	1,0
	II	250	5,0	150	3,0	50	1,0	50	1,0
	III	210	4,2	160	3,2	50	1,0	0	0
	Ср	208	4,1	125	2,5	50	1,0	33	0,6

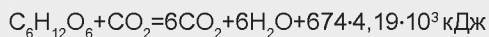
Исследование интенсивности дыхания сахарной свеклы при озонной обработке. Интенсивность дыхания сахарной свеклы характеризует физиологические процессы, происходящие при длительном хранении сахарной свеклы естественной убыли массы сахарной свеклы в основном связаны с интенсивностью дыхания. При кагатном способе хранения сахарной свеклы в основном интенсивность дыхания осуществляется аэробным, т.е. с доступом кислорода воздуха.

В герметичном способе хранения в стационарных ёмкостях сахарной свеклы интенсивность дыхания переходит от аэробного к полностью анаэробному дыханию.

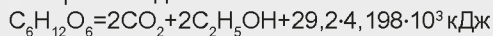
В траншейном способе хранения сахарной свеклы в начале аэробного дыхания имеет место уменьшение количества кислорода в воздухе, также наблюдается тенденция анаэробного дыхания.

Как известно интенсивность дыхания описывается уравнением:

Аэробное дыхание:



Анаэробное дыхание:



При длительном хранении сахарной свеклы при аэробном дыхании выделяется большое количество углекислого газа, воды и тепловой энергии.

Все они влияют на состояние хранения сахарной свеклы по влажности и температуры, а также на развитие болезнетворных микроорганизмов. При анаэробном дыхании сахарной свеклы образуется этиловый спирт, вода и тепловая энергия в малом количестве по сравнению с аэробным дыханием.

Методика определения интенсивности дыхания сахарной свеклы при длительном хранении определялась, согласно описанию выше, в разделе «Методы исследования». Результаты исследования влияние озонной обработки на интенсивность дыхания сахарной свеклы при разных способах хранения приведены в таблице 5.

Из данных таблицы 5 видно, что в контрольных образцах интенсивность дыхания находилось в пределах от 7,15 до 10,1 мг CO_2 /кг.час, при кагатном хранении от 4,29 до 5,5 мг CO_2 /кг.час, герметичном от 4,1 до 4,4 мг CO_2 /кг.час и траншейном на уровне в среднем 6,32 CO_2 /кг.час.

Таблица 5 – Изменение интенсивности дыхания сахарной свеклы при разных способах хранения с озонной обработкой

№ п.п	Названия образца	Повторность	Количество HCl на титрования мл		а	Среднее значение, а	Интенсивность дыхания (J) мг CO ₂ /кг час
			расследовать				
			по ф-фо	по м-ор			
	X _n	I	9,9	10,2	0,3	0,3	
		II	9,9	10,2	0,3		
1	Кагат-контрольный	I	8,8	10,4	1,3	1,3	7,15
		II	8,8	10,4	1,3		
2	ОЗ (кагат-1)	I	9,7	10,7	0,65	0,65	4,29
		II	9,7	10,7	0,65		
3	ОЗ (кагат-2)	I	8,9	10,2	1,0	1,0	5,5
		II	8,9	10,2	1,0		
4	Герметичный-контрольный	I	8,4	10,2	1,5	1,55	8,5
		II	8,3	10,2	1,6		
5	ОЗ (герметичный – 1)	I	9,0	10,2	0,9	0,75	4,1
		II	9,3	10,2	0,6		
6	ОЗ (герметичный - 2)	I	9,3	10,4	0,8	0,8	4,4
		II	9,3	10,4	0,8		
7	Траншейный-контрольный	I	8,1	10,1	1,8	1,85	10,1
		II	8,0	10,1	1,9		
8	ОЗ (траншейный -1)	I	8,9	10,3	1,15	1,15	6,32
		II	8,8	10,2	1,15		

Интенсивность дыхания сахарной свеклы при всех изучаемых способах хранения с обработкой озоном меньше интенсивности дыхания в условиях без обработки у контрольных образцов, что объясняется более благоприят-

ными условиями хранения при озоновой обработке.

Исследование интенсивности дыхания сахарной свеклы при ионоозонной обработке. Результаты исследования влияния ионоозонной обработки на интенсивность дыхания сахарной свеклы при разных способах хранения приведены в таблице 6.

Из данных таблицы 6 видно, что в контрольных образцах интенсивность дыхания находилась в пределах от 8,2 до 12,6 мг CO_2 /кг.час кагатном от 4,5 до 5,22 мг CO_2 /кг.час, герметичном от 4,29 до 4,95 мг CO_2 /кг.час и траншейном от 7,7 до 12,6 мг CO_2 /кг.час.

Интенсивность дыхания сахарной свеклы при всех изучаемых способах хранения с обработкой ионоозоном меньше интенсивности дыхания в условиях без обработки (контрольные варианты), что объясняется более благоприятными условиями хранения при ионоозоновой обработке.

Влияние озонной обработки:

- Обработка озонными потоками значительно снижала микробную нагрузку на поверхности корнеплодов, что приводило к уменьшению количества больных и загнивших экземпляров;

- Убыль массы после озонной обработки была на 10–15% ниже по сравнению с контрольной группой;

- Сохраняемость корнеплодов увеличивалась на 20–25% при оптимальной концентрации озона и времени обработки.

Эффективность ионоозонной обработки:

- Ионоозонная обработка оказалась более эффективной в борьбе с бактериальными инфекциями за счет комбинированного действия ионов и озона;

- Количество больных корнеплодов сократилось на 30% по сравнению с необработанными образцами;

- Убыль массы была минимальной (5–8%), а сохраняемость достигала 80% через 3 месяца хранения.

Таблица-6 – Изменения интенсивности дыхания сахарной свеклы при разных способах хранения с ионоозонной обработкой

№ п.п	Названия образца	Повторность	Количество HCl пошедшее на титрования мл		а	Среднее значения, а	Интенсивность дыхания (J) мг CO ₂ /кг.час
			расследовать				
			по ф-фо	по м-ор			
	X _n	I	9,9	10,2	0,3	0,3	
		II	9,9	10,2	0,3		
		II	8,8	10,2	1,15		
1	Кагат-контрольный	I	8,4	10,2	1,55	1,60	8,8
		II	8,3	10,2	1,65		
2	ИОЗ (кагат-1)	I	10,2	11,3	0,8	0,82	4,5
		II	10,2	11,3	0,8		

3	ИОЗ (кагат-2)	I	9,0	10,2	0,95	0,95	5,22
		II	9,0	10,2	0,95		
4	Герметичный контрольный	I	8,6	10,3	1,4	1,5	8,2
		II	8,5	10,4	1,6		
5	ИОЗ (герметичный - 1)	I	9,7	10,7	0,65	0,65	4,29
		II	9,7	10,7	0,65		
6	ИОЗ (герметичный - 2)	I	8,9	10,1	0,9	0,9	4,95
		II	8,9	10,1	0,9		
7	Траншейный контрольный	I	7,65	10,25	2,35	2,30	12,6
		II	7,7	10,25	2,35		
8	ИОЗ (траншейный контрольный)	I	8,3	10,2	1,7	1,7	7,7
		II	8,3	10,2	1,7		

Вывод. В целом на основе исследования физиологического процесса, происходящего в сахарной свекле при длительном хранении на основе изменения интенсивности дыхания можно отменить важность его снижение при озонной и ионоозонной обработке, которые приводит к снижению всех потерь в том числе естественной убыли. Применение озонных и ионоозонных потоков показало высокую эффективность в продлении срока хранения сахарной свеклы. Наиболее значительные результаты достигнуты при использовании ионоозонной обработки, которая обеспечивает:

- Снижение фитопатологического поражения;
- Минимизацию количественных потерь;
- Улучшение сохраняемости и пригодности корнеплодов к переработке.

Результаты исследования апробированы в ТОО «Коксуский сахарный завод» и ТОО «Меркенский сахарный завод».

Внедрение этих технологий в сельскохозяйственную практику позволит повысить экономическую эффективность сахарного производства за счет снижения потерь на этапе хранения и обеспечения высокого качества сырья.

References /Список литературы (см. страница 47)

**Mirzaeva Sh.U.¹, Khalilov I.M.², Mukhamadiev B.T.³, Khalilova F.M.¹,
Jalolov E.B.¹**

¹Bukhara State University, Bukhara c., Uzbekistan

²Institute of Microbiology of the Academy of Sciences of the Republic of
Uzbekistan, Bukhara c., Uzbekistan

³Bukhara State Technical University, Bukhara c., Uzbekistan

EXTRACELLULAR PEPTIDES OF MUTANTS – CHLORELLA FEEDERS

Abstract. This article presents data from the analysis of biomass and culture medium concerning the content of sulfur-containing amino acids in mutants designated as “feeders” of Chlorella, utilizing the method of radioactive indicators. The objective of this study is to address the question of the nature of the substances responsible for the “feeding” effect attributed to the extracellular products of the mutant “feeders.” To achieve this, a radiochemical method was employed to determine the relative quantities of the sulfur-containing amino acids methionine and cysteine in the biomass and culture medium of various Chlorella mutants, using radioactive sulfur S³⁵. The method for determining the relative amounts of sulfur-containing amino acids in the biomass and culture medium of Chlorella “feeder” mutants is described. It is demonstrated that mutants 94, U-6, U-7, and 722-2-S accumulate cysteine in their proteins at levels 2-3 times higher than those found in the original strain B, while in the peptide fraction (in the medium), the accumulation is nearly six times greater. Low molecular weight peptides find extensive applications in the food, pharmaceutical, and medical industries. They also serve as foundational models for biochemical, genetic, and molecular-biological research. Specifically, these peptides influence the DNA of aged cells, prompting their activation and thereby rejuvenating them. The application sphere of chlorella and other algae encompasses agriculture, where they serve as fertilizers and growth stimulants; medicine, cosmetology, and sports for detoxification and immune system enhancement; aquaculture for oxygen enrichment of water and improving fish health; as well as in the production of biofuels, bioplastics, and as feed additives.

Keywords: chlorella, mutant, feeder, methionine, cysteine, chromatography, radioactive indicator.

Introduction. The industrial utilization of *Chlorella* and other algae necessitates the development of principles and methods for the selection of these organisms. A number of studies [1-4] have demonstrated that the selection of beneficial forms and the assessment of their efficacy can be conducted using microbiological qualitative methods. This method is based on the so-called “feeding effect,” which is identified by the ring of auxotrophic mutants that develop around *Chlorella* colonies. However, it is important to note that the “feeding effect,” as determined by this method, does not yet provide answers to the following questions: 1) What is the underlying mechanism of this effect? Is it due to the active secretion of specific metabolites by *Chlorella*, or is it a result of autolysis and the release of the same substances into the surrounding environment? 2) If the “feeding effect” [8] is attributed to extracellular products from the mutants – termed “feeders” – what is the nature of these substances that elicit this effect? Furthermore, it remains challenging to ascertain the nature of extracellular products [5-10]. The previous work [3] has provided an answer to the first question, specifically that the “feeder” effect is attributed to the extracellular products of mutants.

The aim of the study. The aim of the study is to investigate the substances that cause the nature of “feeding”. To achieve this, a radiochemical method was employed to determine the relative quantities of sulfur-containing amino acids-methionine and cysteine-in the biomass and culture medium of several *Chlorella* mutants using radioactive sulfur S^{35} [11-12].

Materials and Methods of Research. The following strains of *Chlorella* were used as material for the study: Strain B - *Chlorella vulgaris*-served as the starting format for obtaining mutants K-94, U-6, U-7, 283-4, 322, 7179, 7199, 7255, 7232, and 7-22-2-S, which were utilized as controls. The *Chlorella* culture was grown in a sulfur-depleted inorganic medium with the following composition:

KNO_3 5 g/L
 $Mg(NO_3)_2$ 2.5 g/L
 KH_2PO_4 1.25 g/L
 $MgSO_4$ 0.083 g/L
 Glucose 10 g/L

To this solution, $Na_2S_{35}O_4$ with an activity of 2 μC was added in the amount of the indicator. A two-day algal culture was cultivated in flasks containing 15.0 mL of medium under illumination. The light intensity was 5000 lux. The initial cell density was 2×10^6 cells per mL. The duration of the experiment was 10 days. During this period, a sufficient amount of biomass (approximately 100 mg) was obtained for further analyses. The cells were separated from the culture medium by centrifugation. The cells were then extracted three times with 80% ethanol to remove lipids, carbohydrates, and other low-molecular-weight substances [13]. The extract was isolated through extraction but exhibited negligible activity, leading to its disposal. Further processing of the cells involved hydrolysis using equal volumes of concentrated HCl and CH_3COOH . The algae were transferred into an ampoule from which air was displaced with CO_2 . The presence of O_2 dur-

ing hydrolysis reduces the yield of amino acids. The ampoule was then sealed. Hydrolysis was conducted in a thermostat at 105°C for a duration of 28 min. The hydrolysate was subjected to chromatography (Amstell chromatograph, UK) in a solvent system comprising n-butanol, acetic acid, and water in a ratio of 4:1:5. Prior to chromatography, it was essential to separate mechanical impurities and remove HCl [11]. To achieve this, the hydrolysate was applied using a pipette onto a Büchner funnel lined with a double layer of filter paper. The liquid was filtered under vacuum. For enhanced desorption of amino acids, both the ampoule and the filter were rinsed three times with small portions of water. The hydrolysate was then concentrated under vacuum. To ensure the complete removal of HCl during the evaporation process, it was necessary to add 2 ml of water several times [14-20].

Chromatographic analysis of the nutrient medium was performed similarly. Equal amounts (by weight) of the hydrolysates were chromatographed to facilitate comparison of the activities between the mutant strains and the original strains. The fractions obtained from the chromatograms were dried, and the activity measurements were conducted [14].

Results and Discussion. The experiment consisted of four repetitions, the results of which are summarized and presented in Tables 1 and 2. Table 1 provides data regarding the accumulation of radioactive sulfur by the biomass of the strains. The values of specific activities (activity per 10^6 cells and activity per mg of dry biomass) corresponding to the control strains (strain B and 283-4) are set at 100% [21-30]. As shown in this table, the specific activity values of the investigated strains are 1.5 to 2.0 times greater compared to the control strains. To further characterize the strains, we conducted an analysis of the biomass for sulfur-containing amino acids. The absence of significant amounts of activity in the alcoholic extract indicates that sulfur-containing amino acids are predominantly located in the protein portion of the cells [31].

As indicated in Table 2, which presents data obtained from the chromatographic analysis of the alcohol-insoluble fraction following its hydrolysis, the activity corresponding to cysteine in the chromatograms of strains 94, U-6, U-7, and 722-2-S is 2 to 3 times greater compared to the control strain B. In contrast, the activity of methionine remains nearly identical across all these strains. Furthermore, in the strains 722, 7179, 7199, 7232, and 7255, the activity of methionine is 1.5 to 3.0 times higher compared to the control strain 283-4, while the activity of cysteine is elevated up to 1.5 times [32-35]. The examined strains exhibited an increase in activity not only in the alcohol-insoluble fraction but also in the culture medium (Table 3). Table 3 presents the data from the chromatographic analysis of the medium following its hydrolysis. As shown in this table, strains 94, U-6, U-7, and 722-2-S accumulate cysteine in the medium to a concentration that exceeds the control by up to six times, whereas strains 722, 7179, and 7199 accumulate methionine at levels up to five times higher compared to the control strain 283-4.

Table 4 presents the values of R_f obtained from the chromatographic analysis of the nutrient medium before and after hydrolysis. The values of R_f changed as a result of hydrolysis, suggesting that methionine and cysteine accumulate in the

medium not in their free form. It is possible that the alteration in the R_f values is due to the chemical transformations of these amino acids during hydrolysis [36-38].

The results we obtained are consistent with the data available in the literature. Specifically, Kanazawa [10], in studying the ontogenetic variability of the amino acid composition of *Chl. ellip.*, found that methionine and cysteine do not occur in free form but rather as peptides and within proteins. This finding is corroborated by the lack of activity in the alcohol-soluble fraction, where free amino acids and peptides, along with other substances from the strains we studied, should have been extracted, assuming that sulfur-containing amino acids existing in peptide form are nearly completely released into the culture medium [35-37]. Kanazawa's findings [10] suggest that there may be two extreme types of mutants, accumulating methionine and cysteine in either an increased quantity within proteins or within peptides. However, if we assume that the content of amino acids in the first is directly or indirectly related to their content in the second [10], it is possible that there will be mutants with an increased concentration of cysteine and methionine in both proteins and peptides, a hypothesis that is supported by our data (Tables 2 and 3).

Prospects for the application of low-molecular-weight peptides in gerontology include:

1. Heterogeneity of age and algal peptides;
2. Control and management of the synthesis and remodeling of algal peptides;
3. Peptide bioregulators in geriatrics;
4. Characterization of anxiety levels and quality of life;
5. Peptideology of emotions;
6. Algal peptides and intermolecular mechanisms of human body protection;
7. Algal peptides as microbiota correctors.

Table 1 - Specific Activities of Strains (as a percentage of control)

Strain	Activity	
	per 10 ⁶ cells	per mg of biomass
B, control	100	100
94	185	181
U-6	285	219
U-7	175	134
722-2-S	145	159
283-4, control	100	100
722	201	127
7179	106	144
7199	168	148
7232	162	145
7255	196	186

Table 2 - Activity of Cysteine – A_1 and Methionine – A_2 on Chromatograms of Hydromezon Medium (imp/min) and Their Ratios to the Activity of Control Strains (A_1/A_0 и A_2/A_0)

Strain	A_1	A_1/A_0	Strain	A_1	A_1/A_0
B, control	380	1	283-4 control	590	1
94	2170	5,71	7-22	1050	1,78
U-6	1420	3,74	7-179	1700	2,89
U-7	1770	4,70	7-199	1860	3,15
722-2-S	2030	5,34	7232	1940	3,28
			7255	2810	4,77

Table 3 - Activity of Cysteine (A_1) and Methionine (A_2) on Chromatograms of Hydrolysates of Alcohol-Insoluble Fractions of Strains and Their Ratios to the Activity of Corresponding Amino Acids (A_1/A_{01} и A_2/A_{02}) of Control Strains (B, 283-4)

Strain	A_1	A_2	A_1/A_{01}	A_2/A_{02}
B, control	810	1120	1,0	1,0
94	1550	1190	1,91	1,06
U – 6	2520	1190	3,11	1,06
U – 7	2010	1110	2,48	0,99
722-2-S	1700	1620	2,10	1,46
283-4, control	810	780	1,0	1,0
7-22	1070	2280	1,32	2,92
7-179	980	1060	1,21	1,36
7-199	1130	1090	1,40	1,40
7232	1050	1320	1,30	1,69
7255	970	1570	1,20	2,01

Table 4 - R_f Values (S^{35} -containing chromatographic analysis of medium components before (R_{f1}) and after (R_{f2}) Hydrolysis

Strain	R_{f1}	R_{f2}	Strain	R_{f1}	R_{f2}
B, control	0,10	0,08	283-4, control	0,10	0,20
94	0,10	0,08	722	0,10	0,20
U – 6	0,12	0,08	7179	0,12	0,20
U – 7	0,12	0,08	7199	0,10	0,20
722-2-S	0,12	0,10	7232	0,12	0,20
			7255	0,16	0,20

Conclusion: A method for determining the relative quantities of sulfur-containing amino acids in biomass and in the culture medium of *Chlorella* mutants, referred to as “feeders,” has been described. It has been demonstrated that mutants 94, U – 6, U – 7, and 722-2-S accumulate cysteine in their proteins at levels 2 to

3 times higher than those of the original strain B, while in the peptide fraction (in the medium), the accumulation is nearly 6 times greater. Mutants 722, 7179, 7199, 7232, and 7255 not only accumulate more methionine in proteins and peptides (in the medium) compared to the original strain 288-4, but they also exhibit higher levels of cysteine in their proteins.

References /Список литературы

- 1 Квитко К.В., Мухамадиев Б.Т. "Перспективы использования мутантов одноклеточных водорослей при контролируемых условиях культивирования" В сб. "Управляемый биосинтез", "Наука", Москва, С.-252-262, 2006. [Kvitko K.V., Mukhamadiev B.T. "Prospects for the use of mutants of unicellular algae under controlled cultivation conditions" In the collection "Controlled biosynthesis", "Science", Moscow, pp. 252-262, 2006]
- 2 Квитко К.В., и др. "Некоторые принципы генетико-селекционной работы с микроорганизмами в применении к хлорелле", Генетика 2, С. -148, 2008 [Kvitko K.V., et al. "Some principles of genetic selection work with microorganisms as applied to chlorella", Genetics 2, p. -148, 2008]
- 3 Квитко К.В., Мухамадиев Б.Т. "Опыт селекции хлореллы на измененный биохимический состав с использованием спонтанных и индуцированных мутантов" В сб. "Экспериментальный мутагенез у животных, растений и микроорганизмов", Москва, С. 11,44, 2013. [Kvitko K.V., Mukhamadiev B.T. "Experience of Chlorella Selection for Altered Biochemical Composition Using Spontaneous and Induced Mutants" In the collection "Experimental Mutagenesis in Animals, Plants, and Microorganisms", Moscow, pp. 11.44, 2013.]
- 4 Mirzaeva Sh. U., Muxamadiev B. T., Perspective Theoretical Foundations of the Extraction Process, Sulfur Dioxide Chemistry and Environmental Impact, 2024, IntechOpen.
- 5 Гафуров К.Х., Мухаммадиев Б.Т., Мирзаева Ш.У., Сверхкритическая [СК] CO₂ экстракция глицирризиновой кислоты из лакричных корней, Бултеровские сообщения №1, том 49. 2017, Татарстан, С. 108-114. [Gafurov K.Kh., Mukhammadiev B.T., Mirzaeva Sh.U., Supercritical [SC] CO₂ extraction of glycyrrhizic acid from licorice roots, Butlerov Communications No. 1, Vol. 49. 2017, Tatarstan, pp. 108-114]
- 6 Mirzaeva Sh.U., Gafurov K.Kh., Zhumaev Zh., Certificate of official registration of the program for electronic computers. Computer program Optimization of the process of obtaining CO₂ extract from licorice root. DGU 09833 (2021)
- 7 Gafurov K.X., Muxammadiyev B.T, Kuldosheva F.S., Obtaining extracts from plant raw materials using carbon dioxide, Food Science and Technology, Scientific and Production Journal Odessa, Vol. 14 No. 1 (2023), Web of science journal.
- 8 Ilkhom Khalilov, Firuza Abdullayeva, Niyozgul Xodjiyeva, Shoxista Mirzaeva, Optimization of the process CO₂ - extraction of plant raw material, BIO Web of Conferences 141, 01030 (2024) AGRICULTURAL SCIENCE 2024.
- 9 Громов Б.В., Авиллов И.А. "Фенетическая классификация водорослей рода Chlorellif" Вестник ДГУ, С. 9, 2,118, 1985. [Gromov B.V., Avilov I.A. "Phenetic classification of algae of the genus Chlorellif" Vestnik DSU, pp. 9, 2,118, 1985.]
- 10 Kanazawa T., Changes of aminoacid composition of Chlorella cells during her life's of cycle . Plant and Cell Physiology, С.15,13, 2014.
- 11 Мухамадиев Б.Т. "Эффект фидерства и хлореллы, связанный с выделением в среде аргининсодержащих пептидов" Вестник ЛГУ, 1970. [Mukhamadiev B.T. "The effect of

n-chloroulli feeder activity associated with the release of arginine-containing peptides into the medium" Vestnik LSU, 1970.]

12 Материалы международного пептидного симпозиума, 13-14 VI, 2024 г., Москва, Россия. [Proceedings of the International Peptide Symposium, VI 13-14, 2024, Moscow, Russia.]

13 *Mirzaeva Shoxista, Laziz Yuldoshov, Niyozgul Xodjiyeva*, CO₂ - extraction of glycyrrhizic acid from licorice root: optimization of extraction conditions using RSM, BIO Web Conferences 113, 01004 <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411301004>.

14 *Джурраев Х.Ф., Мухаммадиев Б.Т., Мирзаева Ш.У.*, Исследование Международная сверхкритических CO₂ научно-практическая Ф.С. Кудлошева, экстрактов заочная листьев солодки, конференция 330 «Биотехнологические, экологические и экономические аспекты создания безопасных продуктов питания специализированного назначения», Краснодар, 2020, С. 21-27. [Dzhuraev Kh.F., Muhammadiev B.T., Mirzaeva Sh.U., Research of the International supercritical CO₂ scientific and practical F.S. Kuldosheva, absentee licorice leaf extracts, conference 330 "Biotechnological, environmental and economic aspects of creating safe food products for special purposes", Krasnodar, 2020, pp. 21-27.]

15 Старость в России, Если быть точным [Электронный ресурс] <https://tochno.st/problems/ageing> [Old Age in Russia, To Be Precise [Electronic Resource]: <https://tochno.st/problems/ageing>]

16 *Ikramova M L, Buriev SB, Yuldoshov LT, Karimova M F*. Use of chlorella on arid and saline soils of the Bukhara region. Scientific and information magazine of Bukhara State University No. (1), 2024. 94-98 pp. [In Uzbek.].

17 *Uzhanova A.S.* Systematic characteristics of chlorella. Its production and application. - Scientific Bulletin No. 1 (1), 2014. - P. 113. [(In Russ.)].

18 *Safi C., Zebib B., Merah O., Pontalier P.Y., & Vaca-Garcia, C.* (2014). "Morphology, composition, production, processing and applications of Chlorella vulgaris: A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 35: 265-278.

19 *Karpushin G. N.* Possibilities of using chlorella in the medical and agricultural industry. *Jorun. Agrarian History*, № 18, 2024. 22-29 pp. Creative Commons Attribution 4.0 International License. Journal website: https://agrarianhistory.com/O_zhurnale.

20 *Muzaffarov, A M, Taubaev T T*. Chlorella. Tashkent: Fan. 1974. - P. 131 // *Muzaffarov, A.M. Taubaev. T. T. Chlorella. Tashkent: The science. 1974. - P. 131. [In Uzbek.]*.

21 *Jumanieзов, I. et al.* Complex use of chlorella in agriculture. Tashkent: Mehnat, 2000. - P. 55// *Jumanieзов, I. and so on. Complex use of chlorella in agriculture. Tashkent: From, 2000. - P. 55. [In Uzbek.]*.

22 *Muminova R, Rozmatov R Z*. The role of algae in water purification. Scientific Bulletin of Namangan State University. 2020: 2(9), pp.96-100. // *Muminova R.N., Rozmatov R Z. The role of algae in water purification. Scientific Bulletin of Namangan State University. 2020: 2(9), pp.96-100. [In Uzbek.]*.

23 *Muminova, R.* Application of chlorella in cultivation of cultivated plants. *Farg'ona Davlat Universiteti*, 2023. 29(1), 205. Retrieved from <https://journal.fdu.uz/index.php/sjfsu/article/view/1209> [In Uzbek.].

24 *Chmulev I.S.* research on the influence of chlorella vulgaris bin microalgae suspension on potato varieties and samples, carried out for the first time in the magadan region. International Research Journal , No. 1 2023 (127) January plant breeding, seed production and biotechnology DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.31> [(In Russ.)].

25 *Buriev S B , Kabilov A M* Cultivation of chlorella vulgaris and its use for fish feeding. Journal of biology and ecology Tashkent: 2019 No. 2: 45-49b[(In Russ.)].

- 26 Buriev S.B., Rashidov N.E., Kalandarova D.S., Kenzhaeva J. Microscopic and higher aquatic plants of fish ponds, their use in fish farming // Scientific and practical achievements and modern problems in the field of botany. Res. conf. Samarkand 2014. P. 14-15. [In Uzbek.].
- 27 Ikramova M L, Rakhmatov B N, Yunusov R Yu. ³ Application of under- film drip irrigation for high yield yields in saline soils and global warming. «E3S Web of Conferences».2023, <https://www.universitetam.ru/ojs/index.php/e3swebofconferences/authorDashboard/submission/4731>
- 28 Ikramova M L¹, Rakhmatov B N Gaffarov I Ch³, Jalliev B A⁴. Methods for converting unsuitable saline lands into suitable soils using the “Coal Acid Utility Model” «E3S Web of Conferences».2023, апрель <https://www.universitetam.ru/ojs/index.php/e3swebofconferences/authorDashboard/submission/4731>
- 29 Liu L., Pohnert G., & Wei D. (2016). Extracellular metabolites from industrial microalgae and their biotechnological potential. *Marine drugs*, 14(10), P.-191.
- 30 Amin M. A., Chondra U., & Alam M. M. (2024). In Silico Assessment of Photosystem I P700 Chlorophyll a Apoprotein A2 (PsaB) from *Chlorella vulgaris* (green microalga) as a Source of Bioactive Peptides. *Journal of Exploratory Research in Pharmacology*, 9(3), 153-168.
- 31 Guarnieri M. T., Nag A., Yang S., & Pienkos P. T. (2013). Proteomic analysis of *Chlorella vulgaris*: potential targets for enhanced lipid accumulation. *Journal of proteomics*, 93, 245-253.
- 32 Costa M. M., Spínola M. P., Alves, V. D., & Prates J. A. M. (2024). Improving protein extraction and peptide production from *Chlorella vulgaris* using combined mechanical/ physical and enzymatic pre-treatments. *Heliyon*, 10(12).
- 33 Liu L., Pohnert G., & Wei D. (2016). Extracellular metabolites from industrial microalgae and their biotechnological potential. *Marine drugs*, 14(10), 191.
- 34 Wu Q., Ma Y., Zhang L., Han J., Lei Y., Le Y., ... & Fu, C. (2023). Extraction, functionality, and applications of *Chlorella pyrenoidosa* protein/peptide. *Current Research in Food Science*, 7, 100621.
- 35 Liu H., Xian M., Cao Y., Guo J., Kan L., & Xu X. (2023). Omics integration for in-depth understanding of the low-carbon co-culture platform system of *Chlorella vulgaris*-*Escherichia coli*. *Algal Research*, 75, 103252.
- 36 Amin M. A., Chondra U., & Alam M. M. (2024). In Silico Assessment of Photosystem I P700 Chlorophyll a Apoprotein A2 (PsaB) from *Chlorella vulgaris* (green microalga) as a Source of Bioactive Peptides. *Journal of Exploratory Research in Pharmacology*, 9(3), 153-168.
- 37 Liu J., & Chen F. (2014). Biology and industrial applications of *Chlorella*: advances and prospects. *Microalgae biotechnology*, 1-35.
- 38 Anand S., & Padmanabhan P. (2024). Omics approach for enhanced microalgae biomass production with the improved concentration of desired biomolecules. In *Recent Trends and Developments in Algal Biofuels and Biorefinery* (pp. 367-381). Cham: Springer Nature Switzerland

Мирзаева Ш.У.¹, Халилов И.М.², Мұхамадиев Б.Т.³, Халилова Ф.М.¹, Жалолов Е.Б.¹

¹Бұхара мемлекеттік университеті, Бұхара қ., Өзбекстан

²Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының Микробиология институты, Бұхара қ., Өзбекстан

³Бұхара мемлекеттік техникалық университеті, Бұхара қ., Өзбекстан

ХЛОРЕЛЛА ФИДЕР МУТАНТТАРЫНЫҢ ЖАСУШАДАН ТЫС ПЕПТИДТЕРІ

Түйіндеме. Мақалада радиоактивті индикаторлар әдісін қолдана отырып, хлорелланың «фидерлері» мутанттарындағы күкірті бар аминқышқылдарының болуына байланысты биомасса мен культуралық ортаны талдау деректері келтірілген. Жұмыстың мақсаты – «фидерлер» мутанттарының жасушадан тыс өнімдеріне байланысты «фидерлік» әсерін тудыратын заттардың табиғаты қандай деген сұраққа жауап. Ол үшін радиоактивті күкірт S^{35} көмегімен бірқатар хлорелла мутанттарының биомассасы мен өсімділер ортасындағы күкірті бар аминқышқылдарының – метионин мен цистеиннің салыстырмалы мөлшерін анықтаудың радиохимиялық әдісі қолданылды. Биомассадағы және хлорелла «фидер» мутанттарының өсімділер ортасындағы күкірті бар аминқышқылдарының салыстырмалы мөлшерін анықтау әдісі сипатталған. 94, U-6, U-7, 722-2-s мутанттары ақуыздарда циттеинді бастапқы В штаммынан 2-3 есе, ал пептидтік фракцияда (ортада) шамамен 6 есе көп жинайтыны көрсетілген. 722, 7179, 7199, 7232, 7255 мутанттары бастапқы 288-4 штаммымен салыстырғанда белоктар мен пептидтердегі метионинді ғана емес, сонымен қатар белоктардағы цистеинді де жинақтайды. Төмен молекулалық пептидтер тамақ, фармацевтика және медицина салаларында кеңінен қолданылады. Олар сонымен қатар биохимиялық, генетикалық және молекулалық биологиялық зерттеулердің бастапқы үлгілері болып табылады. Атап айтқанда, олар ескі жасушалардың ДНҚ-сына әсер етеді және олардың белсендірілуіне әкеледі және осылайша бұл жасушаларды жасартады. Хлорелла мен басқа балдырлардың қолданылу аясы – тыңайтқыш және өсу стимуляторы ретінде өсімдік шаруашылығында; детоксикация және иммунитетті нығайту үшін медицинада, косметологияда және спортта; суды оттегімен байытып, балықтың жағдайын жақсарту үшін аквашаруашылықта; сонымен қатар биоотын, биопластика өндірісінде және жемшөп қоспасы ретінде.

Түйінді сөздер: хлорелла, мутант, фидер, метионин, цистеин, хроматография, радиоактивті индикатор.

Мирзаева Ш.У.¹, Халилов И.М.², Мухамадиев Б.Т.³, Халилова Ф.М.¹, Жалолов Э.Б.¹

¹Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан

²Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан, г. Бухара, Узбекистан

³Бухарский государственный технический университет, г. Бухара, Узбекистан

ВНЕКЛЕТОЧНЫЕ ПЕПТИДЫ МУТАНТОВ – ФИДЕРОВ ХЛОРЕЛЛЫ

Аннотация. В статье приводятся данные анализа биомассы и культуральной среды на содержание серосодержащих аминокислот у мутантов – “фидеров” хлореллы, используя метод радиоактивных индикаторов. Цель работы – ответ на вопрос какова природа

веществ, вызывающий эффект «фидерства» обусловленный внеклеточными продуктами мутантов – «фидеров». Для этого использовался радиохимический метод определения относительных количеств серосодержащих аминокислот – метионина и цистеина в биомассе и культуральной среде ряда мутантов хлореллы с помощью радиоактивной серы S^{35} . Описан метод определения относительных количеств серосодержащих аминокислот в биомассе и в культуральной среде мутантов – «фидеров» хлореллы. Показано, что мутанты 94, U-6, U-7, 722-2-S накапливают в белках цистеин в 2-3 раза больше, чем исходный штамм В, а в пептидной фракции (в среде) больше почти в 6 раз. Мутанты 722, 7179, 7199, 7232, 7255 накапливают, по сравнению с исходным штаммом 288-4, больше не только метионина в белках и пептидах, а также цистеина в белках. Низкомолекулярные пептиды находят широкое применение в пищевой, фармацевтической и медицинской отрасли. Они также являются исходными моделями для биохимических, генетических и молекулярно-биологических исследований. В частности, они влияют на ДНК старых клеток и вызывают их активацию и тем самым омолаживают эти клетки. Сфера применения хлореллы и других водорослей – растениеводство, как удобрение и стимулятор роста; медицина, косметология и спорт для детоксикации и укрепления иммунитета; в аквакультуре для обогащения воды кислородом и улучшения состояния рыб; а также в производстве биотоплива, биопластиков и как кормовая добавка.

Ключевые слова: хлорелла, мутант, фидер, метионин, цистеин, хроматография, радиоактивный индикатор.

Авторлар туралы мәліметтер

Халилов Илхом Маматкулович – биология ғылымдарының докторы, профессор, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының Микробиология институты, Бұхара қ, Өзбекстан, ilkhom2002@yahoo.com

Мухамадиев Баходир Тимурович – биология ғылымдарының кандидаты, доцент, Бұхара мемлекеттік техникалық университетінің өнеркәсіптік экология кафедрасы, Бұхара қ, Өзбекстан, shohista.m@rambler.ru

Мирзаева Шохиста Усмоновна – техника ғылымдарының докторы (PhD), доцент, Бұхара мемлекеттік университетінің биотехнология және азық-түлік қауіпсіздігі кафедрасы, Бұхара қ, Өзбекстан, shohista.m@rambler.ru

Халилова Феруза Маматкуловна – Бұхара мемлекеттік университетінің «Биология» кафедрасының оқытушысы, Бұхара қ, Өзбекстан, ilkhom2002@yahoo.com

Жалолов Элбек Бахшиллоевич – Бұхара мемлекеттік университетінің оқытушысы, Бұхара қ, Өзбекстан, b.jalolov@buxdu.uz

Сведения об авторах

Халилов Илхом Маматкулович – доктор биологических наук, профессор, Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан, г. Бухара, Узбекистан, ilkhom2002@yahoo.com

Мухамадиев Баходир Тимурович – кандидат биологических наук, доцент кафедра Промышленная экология, Бухарский государственный технический университет, г. Бухара, Узбекистан, shohista.m@rambler.ru

Мирзаева Шохиста Усмоновна – доктор технических наук (PhD), доцент кафедра

Биотехнология и пищевая безопасность, Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан, shohista.m@rambler.ru

Халилова Феруза Маматкуловна – преподаватель, Бухарский государственный университет кафедра «Биология», г. Бухара, Узбекистан, ilkhom2002@yahoo.com

Жалолов Элбек Бахшиллоевич – преподаватель, Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан, e.b.jalolov@buxdu.uz

Information about the authors

Khalilov Ilkhom Mamatkulovich – Doctor of Biological Sciences, Professor, Institute of Microbiology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Bukhara c., Uzbekistan, ilkhom2002@yahoo.com

Mukhamadiev Bakhodir Timurovich – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Ecology, Bukhara State Technical University, Bukhara c., Uzbekistan, shohista.m@rambler.ru

Mirzaeva Shokhista Usmonovna – Doctor of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Department of Biotechnology and Food Safety, Bukhara State University, Bukhara c., Uzbekistan, shohista.m@rambler.ru

Khalilova Feruza Mamatkulovna – Lecturer, Department of Biology, Bukhara State University, Bukhara c., Uzbekistan, ilkhom2002@yahoo.com

Jalolov Elbek Bakhshilloevich – lecturer, Bukhara State University, Bukhara c., Uzbekistan, e.b.jalolov@buxdu.uz

ПЕРЕВОД СТАТЬИ / МАҚАЛАНЫҢ АУДАРМАСЫ

Мирзаева Ш.У.¹, Халилов И.М.², Мухамадиев Б.Т.³, Халилова Ф.М.¹, Жалолов Э.Б.¹

¹Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан

²Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан, г. Бухара, Узбекистан

³Бухарский государственный технический университет, г. Бухара, Узбекистан

ВНЕКЛЕТОЧНЫЕ ПЕПТИДЫ МУТАНТОВ – ФИДЕРОВ ХЛОРЕЛЛЫ

Аннотация. В статье приводятся данные анализа биомассы и культуральной среды на содержание серосодержащих аминокислот у мутантов – «фидеров» хлореллы, используя метод радиоактивных индикаторов. Цель работы – ответ на вопрос какова природа веществ, вызывающий эффект «фидерства» обусловленный внеклеточными продуктами мутантов – «фидеров». Для этого использовался радиохимический метод определения относительных количеств серосодержащих аминокислот – метионина и цистеина в биомассе и культуральной среде ряда мутантов хлореллы с помощью радиоактивной серы S^{35} . Описан метод определения относительных количеств серосодержащих аминокислот в биомассе и в культуральной среде мутантов – «фидеров» хлореллы. Показано, что мутанты 94, U-6, U-7, 722-2-S накапливают в белках цистеин в 2-3 раза больше, чем исходный штамм В, а в пептидной фракции (в среде) больше почти в 6 раз. Мутанты 722, 7179, 7199, 7232, 7255 накапливают, по сравнению с исходным штаммом 288-4, больше не только метионина в белках и пептидах, а также цистеина в белках. Низкомолекулярные пептиды находят широкое применение в пищевой, фармацевтической и медицинской отрасли. Они также являются исходными моделями для биохимических, генетических и молекулярно-биологических исследований. В частности, они влияют на ДНК старых клеток и вызывают их активацию и тем самым омолаживают эти клетки. Сфера применения хлореллы и других водорослей – растениеводство, как удобрение и стимулятор роста; медицина, косметология и спорт для детоксикации и укрепления иммунитета; в аквакультуре для обогащения воды кислородом и улучшения состояния рыб; а также в производстве биотоплива, биопластиков и как кормовая добавка.

Ключевые слова: хлорелла, мутант, фидер, метионин, цистеин, хроматография, радиоактивный индикатор.

Введение. Производственное использование хлореллы и других водорослей делает необходимым разработку принципов и методов селекции этих организмов. В ряде работ [1-4] показано, что селекцию полезных форм и методы оценки можно провести микробиологическим качественным методом. Этот метод основан на так называемом эффекте «фидерства» - подкормки, определяемый по кольцу обрастания аукоотрофных мутантов вокруг колоний хлореллы.

Однако, следует отметить, что эффект «фидерства», определяемый таким способом, ещё не дает ответа на вопросы: 1) за счет чего происходит этот эффект? За счет прижизненного выделения хлореллой в сферу определенных метаболитов, или за счет автолиза и выделения в окружающую среду тех же веществ? 2) Если эффект «фидерства» [8] обусловлен внекле-

точными продуктами мутантов – «фидеров», то какова природа веществ, вызывающих этот эффект. К тому же трудно судить о природе внеклеточных продуктов [5-10].

Предыдущая работа [3] в какой-то мере дала ответ на 1-й вопрос, а именно, эффект «фидерства» обусловлен внеклеточными продуктами мутантов.

Цель исследования – изучение веществ, вызывающих природу «фидерства». Для этого использовался радиохимический метод определения относительных количеств серосодержащих аминокислот – метионина и цистеина в биомассе и культуральной среде ряда мутантов хлореллы с помощью радиоактивной серы S^{35} [11-12].

Материал и методы исследования. Материалом послужили следующие штаммы хлореллы:

В – штамм *Chlorella vulgaris*, послуживший исходной формат для получения мутантов

K-94, U-6, U-7, 283-4, 322, 7179, 7199, 7255, 7232, 7-22-2-S. Служит контролем.

Культура хлореллы выращивалась в обедненной неорганической серой среде следующего состава:

KNO_3 5 г/л

$Mg(NO_3)_2$ 2,5 г/л

KH_2PO_4 1,25 г/л

$MgSO_4$ 0,083 г/л

Глюкоза 10 г/л

К этому раствору добавлялся $Na_2S_{35}O_4$ с активностью 2 μ к в количестве индикатора. Двухдневная культура водорослей выращивалась в колбах с 15,0 мл средой на подсветке. Освещенность 5000 лк. Исходная густота клеток $2 \cdot 10^6$ в мл. Продолжительность опыта 10 дней. За это время мы получаем достаточное количество биомассы (~100 мг) для проведения дальнейших анализов. Клетки отделялись от культуральной среды центрифугированием. Затем клетки экстрагировались 3 раза 80 % этанолом для удаления липидов, углеводов и других низкомолекулярных веществ [13]. Экстракт отделялся экстрагированием, он имел незначительную активность из-за чего отбрасывался. Дальнейшая обработка клеток заключалась в гидролизе их равными объемами концентрированных HCl и CH_3COOH . Водоросли переводились в ампулу, из которой воздух вытеснялся CO_2 . Присутствие O_2 во время гидролиза понижает выход аминокислот. Ампула запаивалась. Гидролиз проводится в термостате при 105°C в течении 28 мин. Гидролизат хроматографировался (хроматограф марки Amstell, Великобритания) в системе растворителей н-бутанол-уксусная кислота – вода (4:1:5). Перед хроматографированием необходимо отделить механические примеси и удалить HCl [11]. С этой целью гидролизат с помощью пипетки наносился на воронку Бюхнера с двойным слоем фильтровальной бумаги. Жидкость отфильтровывалась под вакуумом. Для лучшей десорбции аминокислот ампула и фильтр

промывались трижды небольшими порциями воды. Гидролизат упаривался под вакуумом. Для полного удаления HCl в процессе упаривания необходимо несколько раз добавлять 2 мл воды [14-20].

Хроматографический анализ питательной среды проводился аналогичным образом. Хроматографировались одинаковые количества (по весу) гидролизатов, чтобы получить возможность сравнения активностей мутантов и исходных штаммов. Фракции хроматограмм высушивались и проводилось измерение активностей [14].

Результаты и их обсуждение. Опыт состоял из 4-х повторностей, результаты которого суммированы и представлены в таблицах 1,2. В таблице 1 представлены данные, касающиеся накопления радиоактивной серы биомассами штаммов. Значения удельных активностей (активность на 10^6 клеток и активность на мг сухого веса биомассы), соответствующие контрольным штаммам (штамм В и 283-4) взяты за 100 % [21-30]. Как видно из этой таблицы, значения удельных активностей исследованных штаммов больше в 1,5-2,0 раза, по сравнению с контрольными штаммами. Для более четкой характеристики штаммов был проведен анализ биомассы на серу, содержащую аминокислоты. Отсутствие значительных количеств активностей в спиртовом экстракте свидетельствует, что серосодержащие аминокислоты находятся преимущественно в белковой части клеток [31].

Как видно из таблицы 2, где представлены данные, полученные в результате хромато графического анализа спирт нерастворимой фракции после её гидролиза, активность соответствующая цистеину, на хромато граммах штаммов 94, U-6, U-7, 722-2-S в 2-3 раза больше, по сравнению с контрольным штаммом В, в то время как активность метионина почти одинакова у всех этих штаммов, а у штаммов 722, 7179, 7199, 7232, 7255 активность метионина в 1,5-3,0 раза больше, по сравнению с контрольным штаммом 283-4 и активность цистеина до 1,5 раза [32-35]. У изученных штаммов наблюдалось превышение активности не только в спиртонерастворимой фракции, а также в культуральной среде (таблица 3). В таблице 3 представлены данные хроматографического анализа среды после её гидролиза. Как видно из этой таблицы, штаммы 94, U-6, U-7, 722-2-S накапливают в среде цистеина до концентрации в 6 раз превышающий контроль и штаммы 722, 7179, 7199 накапливают метионин больше, по сравнению с контрольным штаммом 283-4 до 5 раз.

В таблице 4 приведены значения R_f , полученные в результате хроматографического анализа питательной среды до и после гидролиза. Значения R_f изменялись в результате гидролиза, что заставляет предполагать, что метионин и цистеин накапливаются в среде не в свободном виде. Возможно, что изменение значения R_f вызвано химическими превращениями этих аминокислот во время гидролиза [36-38].

Полученные результаты согласуются с данными, имеющимися в литературе. Так, Каназава [10], изучая онтогенетическую изменчивость аминокислотного состава *Chl. ellip.*, обнаружил, что у них метионин и цистеин встречаются не в свободном виде, а в виде пептидов и в белках, что подтверждается отсутствием активности в спирторастворимой фракции, где должны были экстрагироваться свободные аминокислоты и пептид наряду с другими веществами, изученных нами штаммов, если допустить, что серосодержа-

щие аминокислоты, находящиеся в пептидной форме выделяются ими почти полностью в культуральную среду [35-37]. Данные Каназавы [10] позволяют полагать, что могут быть два крайних типа мутантов, накапливающих метионин и цистеин с повышенным количеством его или в белках, или в пептидах. Однако, если допустить, что содержание аминокислот во-первых прямо или косвенно связано с содержанием их, во-вторых [10] возможно, что будут мутанты с повышенным содержанием цистеина и метионина как в белках, так и в пептидах, что подтверждается данными таблиц 2 и 3.

Перспективы применения низкомолекулярных пептидов в геронтологии:

1. Гетерогенность возраста и пептиды водорослей;
2. Контроль и менеджмент синтеза и ремоделирования пептидов водорослей;
3. Пептидные биорегуляторы в гериатрии;
4. Характеристика уровней тревожности и качества жизни;
5. Пептидология эмоций;
6. Пептиды водорослей и межмолекулярные механизмы защиты организма человека;
7. Пептиды водорослей- корректоры микробиоты.

Таблица 1 - Удельные активности штаммов (в % к контролю)

Штамм	Активность	
	на 10 ⁶ клеток	на мг биомассы
В, контроль	100	100
94	185	181
U-6	285	219
U-7	175	134
722-2-S	145	159
283-4, контроль	100	100
722	201	127
7179	106	144
7199	168	148
7232	162	145
7255	196	186

Таблица 2 - Активность цистеина – A_1 , и метионина – A_2 на хроматограммах гидрометодической среды (имп/мин) и их отношения к активности контрольных штаммов (A_1/A_0 и A_2/A_0)

Штамм	A_1	A_1/A_0	Штамм	A_1	A_1/A_0
В, контроль	380	1	283-4 контроль	590	1
94	2170	5,71	7-22	1050	1,78
U-6	1420	3,74	7-179	1700	2,89
U-7	1770	4,70	7-199	1860	3,15
722-2-S	2030	5,34	7232	1940	3,28
			7255	2810	4,77

Таблица 3 - Активность цистеина (A_1), и метионина (A_2) на хроматограммах гидролизатов спиртонерастворимых фракций штаммов и их отношения к активности соответствующих аминокислот (A_1/A_{01} и A_2/A_{02}) и контрольных штаммов (В, 283-4)

Strain	A_1	A_2	A_1/A_{01}	A_2/A_{02}
В, контроль	810	1120	1,0	1,0
94	1550	1190	1,91	1,06
U-6	2520	1190	3,11	1,06
U-7	2010	1110	2,48	0,99
722-2-S	1700	1620	2,10	1,46
283-4, контроль	810	780	1,0	1,0
7-22	1070	2280	1,32	2,92
7-179	980	1060	1,21	1,36
7-199	1130	1090	1,40	1,40
7232	1050	1320	1,30	1,69
7255	970	1570	1,20	2,01

Таблица 4 - Значения R_f (S^{35} – содержащих компонентов хроматографического анализа среды до (R_{f1}) и после (R_{f2}) гидролиза

Strain	R_{f1}	R_{f2}	Strain	R_{f1}	R_{f2}
В, контроль	0,10	0,08	283-4, контроль	0,10	0,20
94	0,10	0,08	722	0,10	0,20
U-6	0,12	0,08	7179	0,12	0,20
U-7	0,12	0,08	7199	0,10	0,20
722-2-S	0,12	0,10	7232	0,12	0,20
			7255	0,16	0,20

Вывод I.

Описан метод определения относительных количеств серусодержащих аминокислот в биомассе и в культуральной среде мутантов – “фидеров” хлореллы. Показано, что мутанты 94, U-6, U-7, 722-2-S накапливают в белках цистеин в 2-3 раза больше, чем исходный штамм В, а в пептидной фракции (в среде) больше почти в 6 раз. Мутанты 722, 7179, 7199, 7232, 7255 накапливают, по сравнению с исходным штаммом 283-4, больше не только метионина в белках и пептидах (в среде), а также цистеина в белках.

References /Список литературы (см. страница 71)

Yurov V.M.¹, Zhangozin K.N.¹, Kargin D.B.²

¹TSK-Vostok LLP, Karaganda c., Astana c., Kazakhstan

²Eurasian National University named after. L.N. Gumilyov, Astana c.,
Kazakhstan

FRICION MECHANISM OF GRAPHITE AND GRAPHENE

Abstract. The article proposes a model of friction of graphite, which is a stack of graphene sheets. The model is based on the thickness of the surface layer, which for graphite is 3 monolayers of graphene. Large internal stresses arise in the surface layer, leading to the occurrence of dislocations and nanocracks. The friction process can be described as a process of elastic-plastic deformation of the surface layer. For graphene, an important role in friction on graphite is played by the nanolayer, which is a quantum nanostructure. Graphene friction occurs in a stepwise manner, taking into account the Tamm states of the surface. It is shown that friction is accompanied by oscillatory and dissipative processes, the formation of a turbulent fragment, and self-organization in the form of Benard cells. A formula has been obtained that can serve as a criterion for selecting an antifriction coating made of graphene or its composites. The terahertz radiation we predicted in graphene refers to surface plasmon-polaritons (plasmons). The most promising approach to creating effective terahertz radiation detectors is the use of nanostructures as a sensitive element. These nanostructures include graphene and graphene-like materials. The proposed model opens a new approach for theoretical and experimental research of processes in nanotribology.

Keywords: antifriction coating, graphene composites, nanostructures, processes in nanotribology, graphene materials, graphite, 2D graphene friction, nanoelectronics.

Introduction. Over the past three decades, zero-dimensional (0D), one-dimensional (1D), and two-dimensional (2D) carbon nanomaterials have attracted considerable attention due to their unique electronic, optical, thermal, mechanical, and chemical properties [1-3]. Friction and wear are characteristics of mechanical systems involving contact between moving components. Here, 2D graphene and its composites play a special role [4]. Graphene has high levels of rigidity, strength, and thermal conductivity and is also impermeable to gas. Graphene is considered a promising material for applications in nanoelectronics and miniaturization of various devices. In addition to solid lubricant, graphene materials can be used to improve various types of composites from polymers to ceramics. They have also demonstrated their effectiveness as nanoadditives for various types of lubricants, such as water, oils, and ionic liquids. A minimal amount of graphene additive can increase the durability of a product. Graphene was discovered 20 years ago [5].

Many works in most countries are devoted to the study of graphene, including the mechanisms of its production [6, 7] and its defect structure [8, 9].

The aim of the work is to provide an overview of the latest works on the friction of 2D graphene and to propose our model for the friction of single-layer and multilayer graphene (graphite).

Review of graphene friction. Two-dimensional 2D graphene materials and their composites are new nanomaterials for application in technological and engineering fields [10-18]. Currently, there are five theories explaining the processes occurring during friction: mechanical (deformation); molecular (adhesion); molecular-mechanical; energy; hydrodynamic [19]. In the review [15], the friction of layered structures is divided into mechanisms: interlayer and surface (Figure 1). Low friction of layered materials was noted back in the 30s of the last century due to the low shear resistance between their adjacent atomic layers (Figure 1-1). For example, these include: muscovite (mica) - $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; graphite (C); transition metal dichalcogenides - MX_2 ($\text{M} = \text{Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Bi, Mo, W}$; $\text{X} = \text{S, Se, Te}$); metal carbides and nitrides, MAX- and MXene-phases and many others [20]. According to the Tomlinson model (Figures 1-2), the friction force depends on the actual contact area, that is, on the roughness of the two rubbing materials, without taking into account their atomic structure [15]. According to the Frenkel - Kontorova model (Figure 1-3), friction occurs due to the movement of dislocations in the crystal, which arise during the movement of two rubbing materials. In this case, any excitation in the crystal is converted into traveling waves, which are called solitons in the continuous model [21]. Hirano et al. (1991) studied atomically smooth surfaces and obtained friction coefficients close to zero on them [15]. They called this phenomenon "superlubrication" or superlubrication (Figures 1-4). However, superlubrication was discovered in 1956 by D.N. Garkunov and I.V. Kragelsky on the "copper alloy - glycerin - steel" system and was called by them the wear-free effect [22]. The mechanism of the wear-free effect during friction does not follow from the five theories of friction (see above) currently in practice and is still debated. In [23], the dissipation of energy between a tungsten tip sliding on a graphite surface was studied using the AFM method. By measuring atomic-scale friction as a function of the angle of rotation between two contacting bodies, the paper showed that the reason for the ultra-low friction of graphite is the incommensurability of the rotated graphite layers, an effect called "superlubricity" (Figures 1-5). A review [24] provided a chronology of the major milestones in the field of superlubricity (Figure 2).

Unlike other critical phenomena such as superconductivity and superfluidity, friction associated with energy dissipation never disappears. Therefore, the criterion for superlubricity is usually chosen as a decrease in the coefficient of friction (the derivative of the friction force to the normal load) of less than $k \approx 10^{-3} \cdot 10^{-4}$. For a low coefficient of friction, the egg-box model was invented (Figures 1-6).

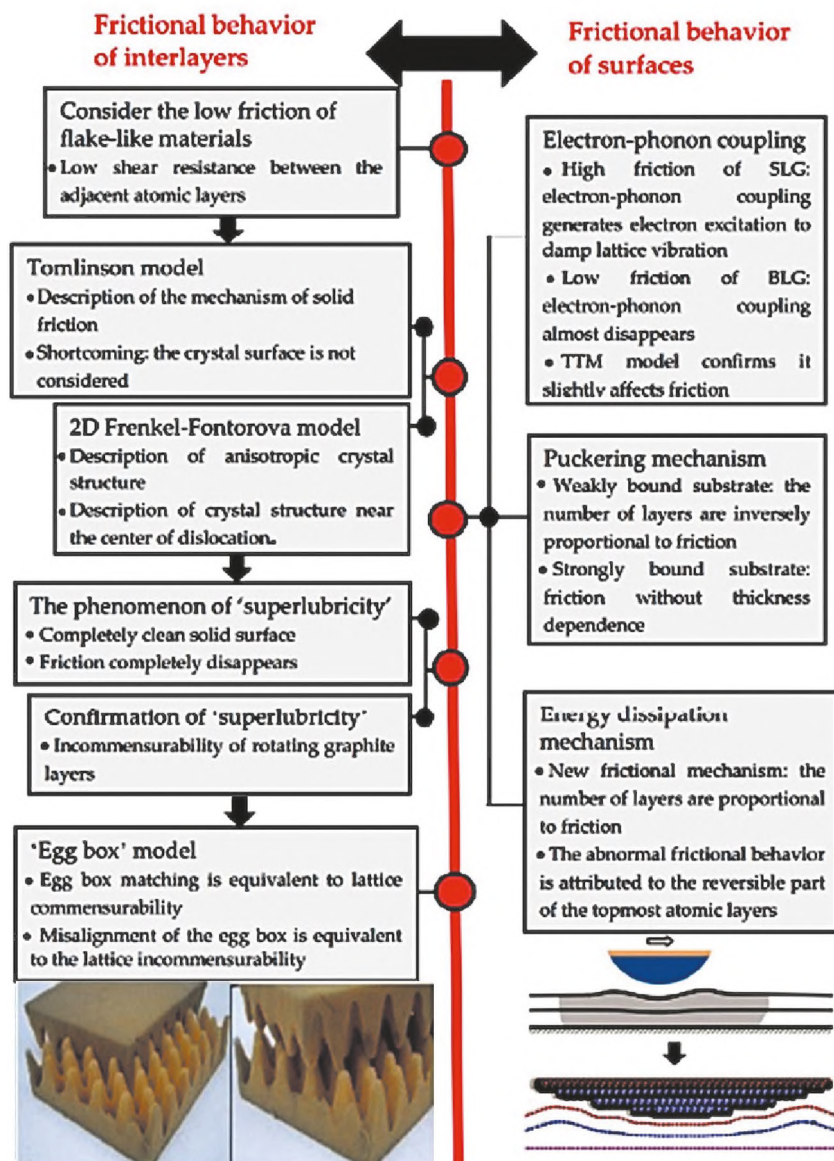


Figure 1 - Summary of friction mechanisms of 2D materials [15]

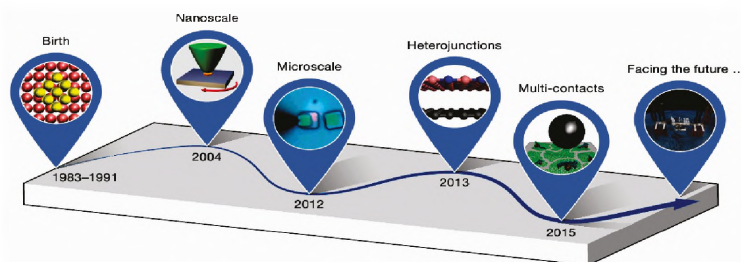


Figure 2 - Timeline of major milestones in the field of structural superlubricity. The timeline starts with the first theoretical prediction of static friction disappearance in 1983 and the study of ultra-low kinetic friction states in 1991 (the "Birth"). This was followed by the pioneering experimental demonstration of nanoscale superlubricity in graphite contacts in 2004, which led to the first observation of microscale superlubricity in 2012 and the proposal of heterojunctions in 2013 and multi-contact configurations in 2015 [24].

The essence of this model is that in layered structures two chains of atoms of size V_0 are considered. The first of them slides over the second with some potential and parameter $\eta=4\pi V_0/(k a^2)$. As soon as $\eta=1$, locally commensurate regions can form, leading to pinning effects and increased friction. It is concluded that ultra-low friction (superlubrication) occurs when the surfaces in contact are incommensurate (Figure 3) [15, 24].

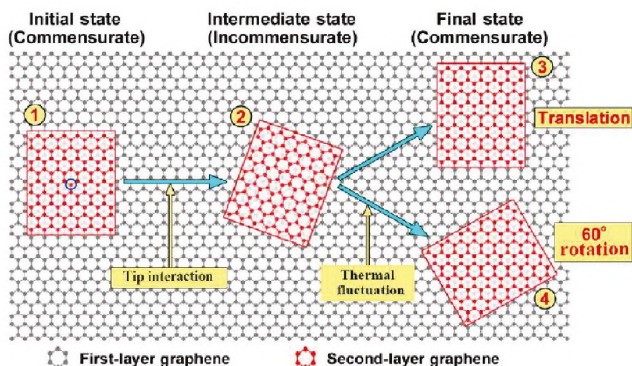


Figure 3 - The process of transformation of the commensurate-incommensurate state during sliding of graphene nanosheets on the graphene surface [15].

Particles on the surface during friction can be commensurate and incommensurate with the arrangement of surface atoms. This difference is especially evident from the oscillation spectra of moving particles. In commensurate structures, atomic particles are located in well-defined unit cells of the crystal. The spec-

trum of atomic oscillations in a two-dimensional structure is determined by the potential of their interaction and has a long-range order (optical branch of oscillations). Incommensurate structures arise when the energy of lateral interaction of atomic particles exceeds the value of the activation barrier. In this case, an acoustic branch appears in the oscillation spectrum, and atomic particles occupy places that are not correlated with the relief of the substrate. A detailed examination of the superlubrication effect is given in the monograph [25]. In [15] it is noted (Figure 1-7) that the MDM method and the two-temperature method (TTM) confirm that the electron-phonon interaction in graphene has an insignificant effect on friction compared to the roughness of the substrate. The substrate condition is of great importance and affects the friction force of 2D materials. When AFM probes slide on the surface of a weakly attached substrate, the friction force is high due to the deformation of graphene in the form of wrinkles (Figures 1–8). However, it was found that mechanically cleaned graphene provides low friction on an atomically smooth substrate such as mica, where graphene suppresses the deformation of surface wrinkles. Penkov O.V. [4] considered the tribological properties of graphene and concluded that the key factors affecting the tribological properties are the number of layers, the stacking mode, and the substrate material. For the energy dissipation mechanism (Figures 1–9), a simulation model is presented in [26], as shown in Figure 4a, b. A diamond tip was used to slide on a three-layer graphite substrate, and the resulting friction energy was recorded continuously during the simulation. A spherical diamond with a tip of radius $R = 200 \text{ \AA}$ and height $h = 8 \text{ \AA}$ was held and moved horizontally along a graphite surface. It was assumed that the top few layers of the tip ($2 \text{ \AA}$ thick) were rigid, and the bottom part was set to be deformable. For the simulation, the top surface of the diamond tip was oriented along the direction. The graphite substrate contains three graphene layers with a length of $266 \text{ \AA}$ and a width of $245 \text{ \AA}$. The coordinates were chosen: the Z axis was perpendicular to the graphite, the X axis ran in a zigzag direction, and the Y axis was along the chair direction (Figure 4a.) The graphene layer was fixed. The top two graphene layers were also fixed to avoid sliding between the layers.

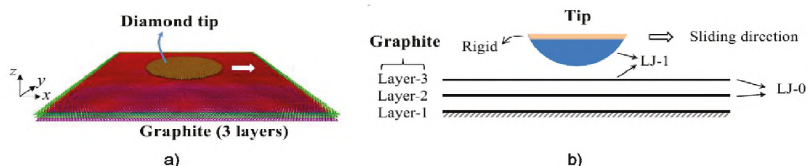


Figure 4 - Simulation model: atomistic model used in molecular dynamics simulation (a); schematic diagram showing the diamond-graphite system and their specific interactions (b) [26].

In the MD simulation, two Lennard-Jones (LJ) potentials were used to describe the atomic interactions between the diamond tip and graphite (LJ-1) and between

different graphite layers (LJ-0). The LJ potential is formulated as $U(r) = 4\epsilon[(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6]$, where ϵ is the depth of the potential well and σ is the distance at which the potential is zero. In [26], friction was studied when the adhesion was relatively weak ($\lambda = 0.5$). In Figure 5a, two types of energy are shown: U_{int} is the energy associated with the sliding of the diamond tip on the surface; U_{bulk} is the energy associated with the deformation of the bulk. The change in friction force F_f as a function of normal load is shown in Figure 5b.

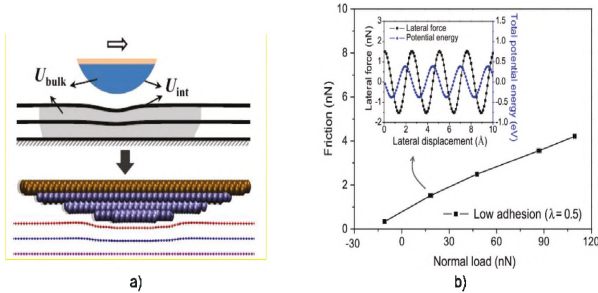


Figure 5 - Schematic and typical simulation result of the deformed configuration for low adhesion systems (a); the change in the friction force F_f depending on the normal load. The inset shows the change in the lateral force and potential energy as a function of lateral displacement under the action of a normal load of 18.3 nN [26].

When the adhesion of the tip to the graphite is relatively strong ($\lambda = 5$), the change in the friction force F_f depending on the normal load is equal to, as shown in Figure 6b. The changes in the lateral force and the total potential energy of the system as a function of lateral displacement under a typical normal load are shown in the inset. Similar to the case of low adhesion, the energy corrugation U_{total} also turns out to be periodic and very close to a sinusoidal shape. The simulation result showed that under high adhesion, delamination of several upper layers of graphite occurs, as shown in Figure 6a.

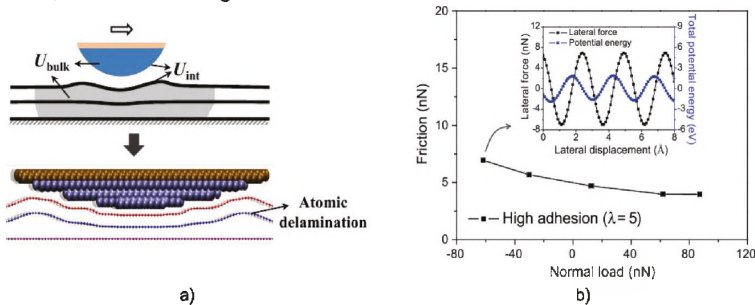


Figure 6 - Schematic and typical result of the simulation of the deformed configuration for systems with high adhesion (a); the change in the friction force F_f depending on the normal load. The inset shows the change in the lateral force and the total potential energy of the system as a function of lateral displacement at a normal load of -61.8 nN (b) [26].

The energy dissipation (Figure 1-9) associated with frictional sliding occurs not only from the interfacial interaction, but also from the deformation inside the layered materials.

Using a calibrated grating as a substrate, it was possible to measure the friction coefficient of graphene, which varied from 0.066 to 0.087. The periodicity of friction was also explained by atomistic incommensurability. The most significant decrease in friction occurred when the number of graphene layers was changed from one to two. This means that at least two graphene layers are necessary to provide solid lubricity due to the sliding of graphene layers relative to each other. When graphene nanoflake slid on graphite at low temperature (only 5 K), it exhibited a superlubricity state. In particular, 100% superlubricity was observed for contact areas less than $1 \times 10^6 \text{ nm}^2$, and the probability dropped to 58% and 12% when the contact area was increased to 3×10^6 and $1 \times 10^9 \text{ nm}^2$. If the contact area exceeded $4 \times 10^8 \text{ nm}^2$, the superlubricity of graphene completely disappeared. It was concluded that the shear occurs mainly along the grain boundaries [4].

Despite the nanoscale thickness of graphene layers, they effectively reduce friction and wear not only at the nano- but also at the macroscale. The key factors affecting friction and wear are the number of layers and adhesion to the substrate. The latter two factors are mainly related to specific deposition methods. The best results can be obtained when graphene is grown on a rigid substrate and left intact [4].

Research method. Our model of graphite and graphene friction. Multilayer graphene or graphite is a layered 3D structure. Each layer consists of regular hexagons of carbon atoms (C) measuring 0.335 nm, between which strong covalent bonds act with an energy of 170 J/mol. Between the layers there is a space of 0.7-1.6 nm, where weak van der Waals forces act with an energy of 16.7 J/mol (Figure 7a). These graphene layers easily slide in the longitudinal direction and represent a solid lubricant (Figure 7b) [27].

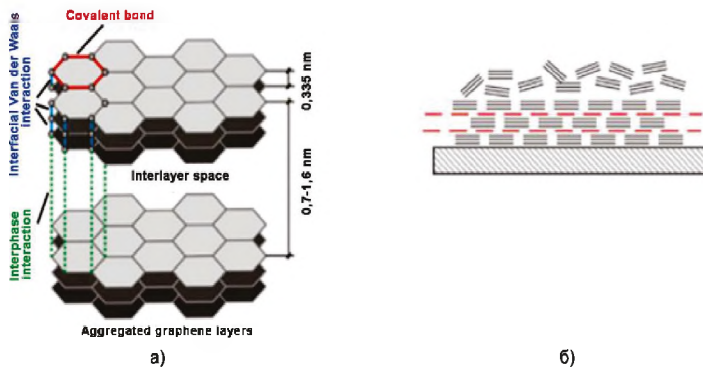


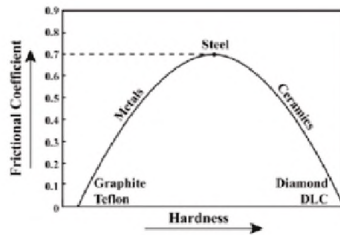
Figure 7 - Graphite structure (a) and layer diagram on metal (the dotted line denotes the plane of easy shear) (b) [27].

Antifriction graphite and its application in industry have been used for a long time [28]. In Kazakhstan, a monograph is devoted to carbon materials [29].

In the periodic table of D.I. Mendeleev, the position of carbon in the central column and upper row is shown (Figure 8a). In the central column, carbon has the largest number of covalent bonds per atom (4). The upper position makes its atoms the smallest among all elements of the central column. Figure 8b shows the dependence of the friction coefficient on hardness. As can be seen, the friction coefficient of diamond is about 0.1, as is the case with graphite.

Li	Be	B	C	N	O	F
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At

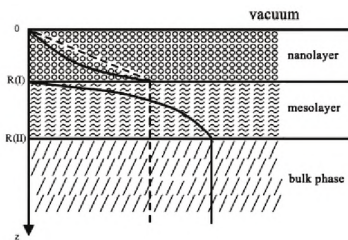
a)



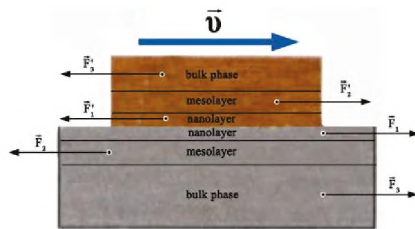
b)

Figure 8 - D.I. Mendeleev's table showing materials with atomic bonds. This table does not include hydrogen and noble gases (a); the coefficient of friction as a function of hardness (b).

It has now become common knowledge that friction is associated with the surface layer of a solid [30, 31]. Determining the thickness of this layer $R(l)$ experimentally is a complex task that requires ultra-high vacuum and complex equipment [32]. This problem has been solved only for a few substances. For example, for gold $R(l) = 1.2$ nm, and for silicon - $R(l) = 3.2$ nm [32], i.e. they represent a nanostructure. We first determined the thickness of the surface layer of solids in [33-35] (Figure 9a), and friction in [36] (Figure 9b).



a)



b)

Figure 9 - Scheme of a solid: nanolayer → mesolayer → bulk phase (a); scheme of the motion of atomically smooth graphite on atomically smooth metal surfaces with a constant velocity u .

The thickness of the surface layer $R(l)$ is given by the formula [33-35]:

$$R(I) = 0,17 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha \cdot v \text{ [m]}. \quad (1)$$

In equation (1) one parameter must be known – the molar volume of the element, which is equal to $v = M/\rho$ (M is the molar mass, ρ is its density), $\alpha = 1 \text{ m}^{-2}$ is a constant to maintain the dimensionality of $R(l)$ [m]).

In [37] it is shown that the surface energy of a bulk metal γ_2 is equal to an accuracy of 3%

$$\gamma_2 = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \text{ [J/m}^2\text{]}, \quad (2)$$

where T_m is the melting temperature of the metal (K).

In the $R(l)$ layer, the size effect must be taken into account and the surface energy becomes equal to γ_1 [38]:

$$\gamma_1 = \gamma_2(1 - R(I)/R(I) + h) \approx 0,5\gamma_2, \quad (3)$$

where γ_{12} is the surface energy at the phase boundary, which is negligibly small due to the second-order phase transition.

To separate the $R(l)$ layer from the rest of the crystal, energy must be expended, which is called the adhesion energy [39]:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \approx \gamma_1 + \gamma_2. \quad (4)$$

Internal stresses σ_{is} between phases γ_1 and γ_2 can be calculated using the formula [39]:

$$\sigma_{is} = \sqrt{W_a \cdot E/R(I)}, \quad (5)$$

where E is the Young's modulus of elasticity.

Using equations (1) - (5), we calculate the parameters for graphite and graphene.

Table 1 - Parameters $R(l)$ of graphite and graphene

Carbon	M , g/mol	ρ , g/sm ³	$R(l)_a$, nm	$R(l)_c$, nm	γ_a , mJ/m ²	γ_c , mJ/m ²
Graphite	12,0107	2,26	0.900 (3)	2.46 (3)	2195	130
Graphene	12,0107	2,26	0,246 (1)	0,14 (1)	2652	-

From Table 1 it follows that the thickness of the surface layer of graphite is 0.9 and 2.46 nm, i.e. they represent a nanostructure. In graphite, the number of mono-layers in the $R(l)$ layer is three (3) – compare with Figure 4. Figure 10a shows how the internal pressure changes depending on the number of graphene layers [40]. Figure 10b shows the intensity of the peak G of the Raman scattering of graphene depending on the number of its layers [41]. Both figures clearly show that the $R(l)$ layer for graphite contains 3 layers, which indicates the validity of our model (1).

More than three layers of graphene are converted into graphite and the values of the quantities in Figure 10 cease to depend on the number of layers.

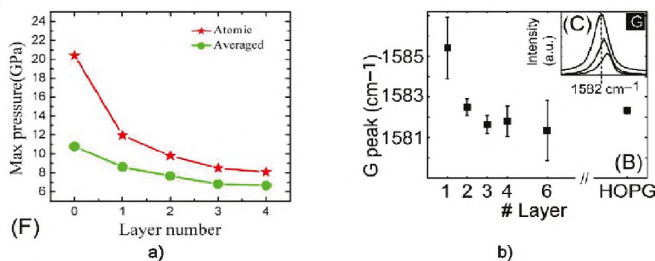


Figure 10 - Change in the maximum atomic stress (red line) and maximum average pressure (green line) depending on the number of graphene layers (a) [40]; G line frequency depending on the number of stacked layers (mean value and standard deviation). The inset shows the G peak for HOPG (upper peak), bilayer (middle peak) and monolayer (lower peak) graphene. The vertical dotted line indicates the standard for bulk graphite (b) [41].

Table 1 raises the question of the thickness $R(l)c$ for monolayer graphene? It is believed that the step height of a graphene monolayer obtained by AFM is equal to its thickness. Various authors report the thickness of a graphene monolayer in the range $R(l)_c = 0.5\text{--}1.7$ nm depending on the samples and measurement conditions [42, 43]. In [44], the thickness of a graphene monolayer was $R(l)_c = 0.86$ nm. The variation in the graphene monolayer thickness reported by different authors may be due to a slight difference in the adhesion between the AFM tips, graphene, and the substrate. It was demonstrated in [42] that the use of advanced AFM modes, such as the PeakForce tapping mode, can reduce the measurement error of the first layer from 0.3–1.3 nm to 0.1–0.3 nm. The average value for graphene is $R(l)_c = 0.15$ nm [42]. This value coincides with our value $R(l)_c = 0.14$ nm (Table 1), taken from the reference book [45], where the radius of carbon is given (0.07 nm). Then its diameter is 0.14 nm, and graphene is a monatomic allotropic modification of carbon. Such a discrepancy in the determination of $R(l)c$ by different authors is also due to the fact that free graphene is subject to wrinkling (see below). In the $R(l)$ layer, reconstruction [32] of monolayers occurs (Figure 11).

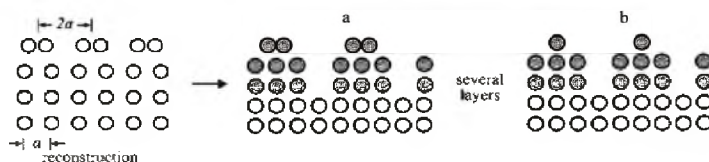


Figure 11 - Reconstruction of the graphite surface.

The size effects in the R(l) layer are determined by the entire group of atoms in the system (collective processes). Such “semi-classical” size effects are observed only in nanoparticles and nanostructures [46]. In [47], it was shown that for surface layer sizes of less than 6-8 layers, the energy of quantum states changes in a stepwise manner. Moreover, each step is assigned corresponding quantum states. Thus, the R(l) layer is not only a nanostructure, but also a quantum structure at any temperature. The properties of the R(l) layer can differ significantly from the volume, which already follows from the properties of graphene [48].

Table 1 raises the question of the surface energy γ of graphite and graphene. The terms free surface energy (FE) and specific surface energy are usually used to characterize the thermodynamic properties of the solid-gas (vacuum) boundary. If we consider the liquid-gas (vapor) or solid-liquid interface, we speak of surface tension, the dimension of which is equal to - N/m. Note that $\text{J/m}^2 = \text{N}\cdot\text{m/m}^2 = \text{N/m}$. Experimental determination of the surface energy of solids is complicated by the fact that their molecules (atoms) are unable to move freely. An exception is the plastic flow of metals at temperatures close to the melting point. Currently, more than twenty methods for determining γ are known. Many monographs, articles and patents are devoted to methods for determining the PE of solids (see the bibliography in [49, 50]). For graphene and graphite, the following PE methods are used: the “sessile drop” method (Figure 12a) and the crystal cleavage (splitting) method (Figure 12b).

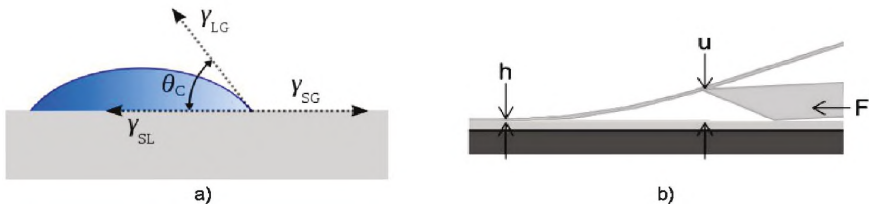


Figure 12 - Illustration of the sessile drop method with a liquid drop partially wetting the solid base (a); splitting the crystals using a quartz wedge (b).

The sessile drop method uses Young's equation:

$$\cos\theta_C = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG}, \quad (6)$$

where γ_{SG} , γ_{SL} are the values of surface energies at the solid/vapor and solid/liquid interfaces, respectively; γ_{LG} is the value of surface energy at the liquid/vapor interface (surface tension energy).

In the method of I.V. Obreimov, cleavage (splitting) of crystals is carried out according to the formula:

$$\gamma = \frac{E \cdot h^2}{24(1-\mu^2)} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \mu^2}, \quad (7)$$

where E is Young's modulus, μ is

Poisson's ratio, h is the film thickness, and u is the angle between the tangent to the curved contour of the detached plate and the direction of the developing crack mouth. In [51], using the sessile drop method, the surface energy of graphene and graphene oxide is 46.7 and 62.1 mJ/m², respectively, while natural graphite flakes exhibit a free surface energy of 54.8 mJ/m² at room temperature. In [52], it was shown that the surface free energy of suspended monolayer graphene is zero, indicating its superhydrophobicity. This follows from equation (6), where the contact angle θ of any liquid droplet on a suspended graphene monolayer is 180°. This experimental result was confirmed theoretically using the molecular dynamics method. In [53] it is noted that one of the advantages of the contact angle for measuring surface energy is that it is a widely used, relatively simple experiment that does not require expensive specialized equipment. In this work, it was found that the surface energy of the basal plane of graphite is 63±7 mJ/m², regardless of the size of the graphite flakes. The surface energy of the basal plane of graphene is 62±4 mJ/m², regardless of the size of the nanosheet. In the latest work [54], it was shown that the average surface energies of graphene, graphene oxide and graphite are 44.8±14.7, 47.9±7.2 and 53.6±2.1 mJ/m², respectively. Let us turn to the previous article of these authors and present their results in Table 2 [55].

The most reliable version of the method for determining γ , based on the splitting of a crystal, was proposed in 1930 by I. V. Obreimov [56]. The idea of this work is as follows. A plate is split off from a mica crystal along the cleavage plane, which, under the influence of the moment of forces acting against the surface forces, partially bends (Figure 12b). This plate can be used as a dynamometer measuring the splitting force. Recently, in work [57], a study was conducted by splitting mica in a way similar to Obreimov's approach, but using modern research methods. The adhesion energy from formula 4: $W_a = 2\gamma = 0.81 \pm 0.38$ J/m², in Obreimov [56] $W_a = 0.76$ J/m², in works [58, 59] $W_a = 0.6 \pm 0.8$ J/m², and in our theoretical work $W_a = 0.809$ J/m² [60].

Table 2 - Static contact angles and associated free surface energy

Substrate	Liquid	$\theta \pm 1$	γ , mJ/m ²
Si	Water	64	66.75
Si/graphene	Water	92	42.49
Cu-pure	Water	68	60.42
Cu-pure	5.123M NaCl	87	44.76

Cu/graphene	Water	86	45.27
Cu/graphene	1.256M NaCl	77	51.06
Cu/graphene	2.022M NaCl	71	56.72
Cu/graphene	2.468M NaCl	80	48.85
Cu/graphene	2.775M NaCl	72	55.65
Cu/graphene	3.677M NaCl	75	52.74
Cu/graphene	5.173M NaCl	76	51.87

Obreimov's method was used for graphite in works [60-63], the analysis of which was carried out in work [64]. The surface energy of the prismatic face of graphite turned out to be equal to $\gamma_a = 1500-5000 \text{ mJ/m}^2$, the surface energy of the basal face of graphite turned out to be equal to $\gamma_c = 130-150 \text{ mJ/m}^2$. This is a significant difference between the values for graphite (see above). Our values of γ_a and γ_c , presented in Table. 1, calculated using formula (2) taking into account the coefficient of thermal expansion of graphene and graphite, proportional to thermal conductivity (Figure 13a). The coefficient of thermal expansion of graphene has a minimum at room temperature and is $-3.7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (Figure 13b), which in absolute value is three times higher than the coefficient of thermal expansion of graphite in the plane at the same temperature ($1.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [65]. From Figure 13a it follows that graphite contains 3 graphene monolayers (see Table 1, Figure 10), which confirms our model. The reason why the sessile drop and crystal splitting methods give values with a difference of an order of magnitude is as follows: firstly, the classical Young equation, obtained on the basis of the thermodynamic approach, does not work. Therefore, the equation of the contact angle requires serious revision. And such a revision was made in the works [66, 67]. The new equation for the contact angle is now called the Young-Verkholomov equation:

$$\cos \theta_c = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG}, \quad (8)$$

where γ_A is the adhesion force at the solid/vapor interface; γ_{SL} , γ_{LG} are the surface tensions of the liquid at the liquid/solid and liquid/vapor interfaces, respectively.

Secondly, the sessile drop method gives the value of the surface tension of the liquid on the solid, but not the surface energy of the same solid. This is clearly demonstrated in [66], where it is said that the surface tension of water on the surface of porous silicon was 70.6 mJ/m^2 . This does not differ much from Table 2, where the surface energy of silicon is determined as 66.75 mJ/m^2 . This means that all works [51-55] based on the sessile drop method cannot give the value of the surface energy of a solid. This is due to the fact that according to Gibbs, it is necessary to distinguish between the surface energy and surface tension of solids; they coincide only for liquids [67].

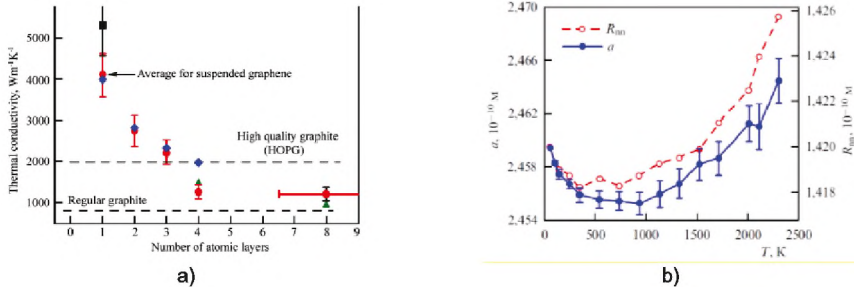


Figure 13 - Dependence of the thermal conductivity coefficient of films composed of several graphene layers on the number (a); thermal expansion of graphene (b) [65]

Today, the relationship between the magnitude of surface energy γ and surface tension σ is determined by the Shuttleworth equation:

$$\gamma = \sigma + \Omega \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_T \quad (8)$$

Here Ω is the surface area of the solid; T is the temperature. This means that in Table 2 the value γ must be replaced by the value σ . This is confirmed by the fact that in Table 2 for copper Cu with water the value $\gamma=60.42 \text{ mJ/m}^2$ was obtained. However, the exact measurement of the surface energy of copper by the "zero creep" method [68] is given in Table 3.

Table 3 - Surface energy of pure metals [68]

Metal	$\gamma, \text{ mJ/m}^2$	Metal	$\gamma, \text{ mJ/m}^2$	Metal	$\gamma, \text{ mJ/m}^2$
Ag	1205	δ -Fe	1910	Si	2130
Au	1410	γ -Fe	2170	Sn	673
Al	1140	Ga	767	Ta	2480
Bi	504	Cd	820	Ti	1938
Cd	675	In	633	Tl	562
Co	2424	Mo	2630	V	1950
Cr	2090	Nb	2210	W	2690
Cu	1520	Ni	1940	Zn	868

Using equations (1)-(5), we calculate the parameters for graphite and graphene (Table 4).

Such large internal stresses σ_{is} lead to significant warping of single-layer graphene, experimentally discovered in [69, 70] and theoretically studied in [71, 72]. Such warping of graphene leads to an increase in its friction coefficient [4].

In [73], it was shown that even small deformations of graphene within 10% are sufficient to change its surface and its adsorption properties.

Table 4 - Elastic parameters of graphite and graphene

Carbon	W_{aa} , J/m ²	W_{ac} , J/m ²	σ_{isa} , GPa	σ_{isc} , GPa	E_a , GPa	E_c , GPa
Graphite	2,853	1,690	4,9	1,36	7,59	3,48
Graphene	3,448	-	118,4		1000	-

If in Table 4 we take $\sigma_{isa}=118.4$ GPa for graphene as 100%, and $\sigma_{isa}=4.9$ GPa for graphite as x%, then during the formation of graphene we will obtain a graphene deformation of 4%, which is slightly lower than the mentioned 10%. Table 5 presents the forbidden zones calculated in the work [73] by varying the deformations with a step of 2% in the range from an unstrained graphene sheet to 20%.

It is evident from Table 5 those uniaxial deformations are capable of opening very small band gaps, and the dependence of the band gap on deformation is non-monotonic. The zigzag (Z) and armchair (A) directions correspond to the ends of graphene.

The work [74] can be cited on the warping of the graphene surface due to internal stresses. It shows an AFM image of the graphene surface, from which it is evident that the surface consists of domains measuring 20x50 nm, oriented in one direction and forming "folds" on the graphene surface with a height of 1 nm. In this case, the roughness value over an area of 0.5x0.5 μm is about $R_a=0.25$ nm.

Table 5 - Energy gap in the band structure of graphene (Δ , meV) for uniaxial deformation of the sheet (σ) in the zigzag (Z) and armchair (A) directions [73]

σ , %	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Δ_z	0	10	0	10	70	10	60	60	20	30	30
Δ_A	0	20	30	30	20	10	10	50	90	110	80

If we consider Figure 9b, as well as Table 4, we can see that the friction process itself can be described as a process of elastic-plastic deformation of the surface layer. In [75], we proposed the formula:

$$\begin{aligned} A(r)/A(\infty) &= 1 - R(I)/r, \quad r \gg R(I), \\ A(r)/A(\infty) &= 1 - R(I)/R(I) + r, \quad 0 \leq r \leq R(I), \end{aligned} \quad (9)$$

where $A(r)$ is a physical property of the nano- and mesolayer with coordinate r ; $A(\infty)$ is a physical property of the bulk sample (bulk phase) (Figure 9a).

If the coefficient of friction k during the movement of graphite (graphene) on graphite (graphene) is taken as the physical property $A(r)$, then at $1 - R(I)/R(I) + r \approx$

$\exp[-(R(I)/R(I)+r)]$ in the nanolayer we will have $k(r) = k(\infty) \exp[-(R(I)/R(I)+r)]$. After this, the friction in the nanolayer, that is, at $r = 0$ and at $r = R(I)$ will be equal to: $k(0) = k(\infty) (1/e) = 0.1/2.72 = 0.04$; $k[R(I)] = k(\infty) (1/e^{1/2}) = 0.1/1.65 = 0.06$. Here $k(\infty) = 0.1$ for graphite is taken from Figure 8b. As a result, in the graphite nanolayer, the friction will look, taking into account the work [47], as shown in 14a. In the mesolayer, the friction will depend on formula 1 in equation (9), with $1-R(I) \approx \exp(-R(I)/r)$. Then $k[R(I)] = k(\infty) (1/e)$ (Figure 9a) and the friction will look as in Figure 14b.

Let us now explain everything said above in detail. As the upper graphite moves along the surface of the lower one, a new surface of nanometer thickness is formed. This means that the friction performs an oscillatory motion (Figure 15 a). The layers $R(I)$, $R(II)$ and the bulk phase have different values of internal friction, which is proportional to the internal stresses $k \sim \sigma_{is}$ from Table 4. When the graphite from above begins to move, a turbulent fragment is formed by friction (Figure 15 b) [76]. This is manifested in the microstructure found on the surface of steel 20 [77] (Figure 16 a) and on our alloy CrNiTiZrCu [78] (Figure 16 b). The same thing happens in graphite.

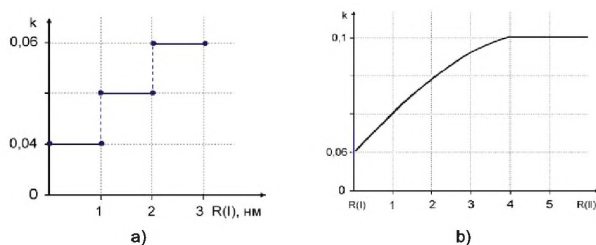


Figure 14 - Dependence of the friction coefficient in the nanolayer (a) and in the mesolayer (b).

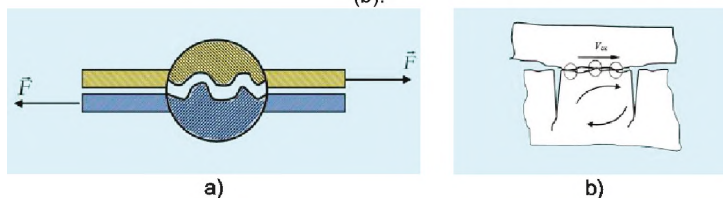


Figure 15 - Oscillatory friction motion during the formation of a new surface (a); diagram of the formation of a turbulent fragment (b).

A similar structure in Figure 16 is characteristic of Benard cells [79].

Benard cells are the occurrence of ordering in the form of convective cells in the form of cylindrical shafts or regular hexagonal figures in a layer of viscous liquid with a vertical temperature gradient. And the temperature gradient $\text{grad}T \sim k$, i.e. is proportional to the coefficient of internal and external friction, therefore friction is similar to a viscous liquid (Figure 17). A similar effect was noticed relatively recently [80].

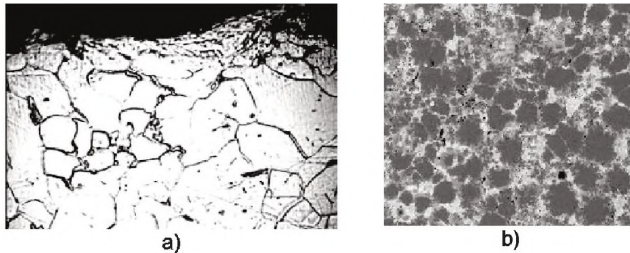


Figure 16 - Friction surface at the moment of turbulent fragment of a sample made of steel 20 [77] (a) and alloy CrNiTiZrCu (b) [78].

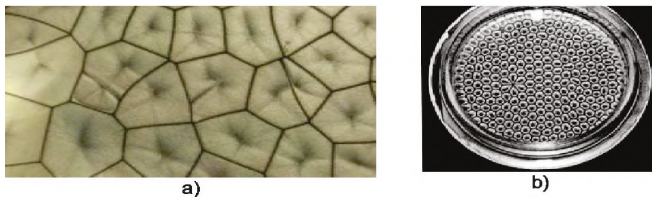


Figure 17 - Benard cells with PMS-10 silicone oil with aluminum powder (a) and (b) with different magnification [79].

More strictly (see, for example, [79]), when analyzing processes in the Benard system, the Rayleigh number is chosen as the control parameter: $Re = gL^3\alpha$, where g is the acceleration due to gravity, L is the characteristic size, α is the coefficient of volumetric expansion, dT is the temperature gradient, ν is the kinematic viscosity, and a is the thermal diffusivity of the medium. Since the kinematic viscosity $\nu \sim 1/\gamma$, γ is the surface energy, it follows from the above expression for the Rayleigh number that the control parameter in our case is $Re \approx C L^3 \gamma$, where $C \sim \text{const}$, and $L = R$ and $2\gamma = W_a$. In other words, if the product $R(l) \cdot W(l)_a$ for moving graphene on the surface of graphite is less than the similar product, then their difference, including the roughness of the rubbing materials, is equal to:

$$\left[R(l) \cdot W_{aa} \right]_{\text{графен}} - \left[R(l) \cdot W_{aa} \right]_{\text{графит}} + R_a \cdot W_{12} = F = kL, \quad (10)$$

where F is the friction force during the movement of rubbing materials; R_a is the roughness; L is the length of the path of movement; k is the coefficient of friction; W_{12} is the adhesion energy between two materials.

Equation (10) can serve as a criterion for selecting an antifriction coating made of graphene or its composites. For graphene, the nanolayer $R(l)$ plays a role in friction on graphite; its friction occurs in a stepwise manner, according to the work [47] taking into account the surface states of Tamm [81] (Figure 14a).

A measure of the internal friction of a crystal is the value Q^{-1} , which according

to Debye is equal to [82]:

$$Q^{-1} = 2Q_{\max}^{-1} \frac{2\pi f\tau}{1 + (2\pi f\tau)^2}, \quad (11)$$

where f is the sample oscillation frequency, τ is the relaxation time, and for graphene $Q^{-1} = \sigma_{\text{is}} = 0.18 \cdot 10^{12} = \delta/\pi$ (δ is the logarithmic damping decrement). The maximum value of internal friction is achieved at $2\pi f\tau = 1$.

The relaxation time τ can be determined for the R(l) layer, knowing the speed of sound in graphene – $\tau_1 = R(l)/u$. The speed of sound in graphene is $u=21.3 \cdot 10^3$ m/s [83]. Then $\tau_1=0.0115 \cdot 10^{-12}$ s and $f_1=13.8$ THz. This means that terahertz radiation is observed for graphene (Figure 18) [84].

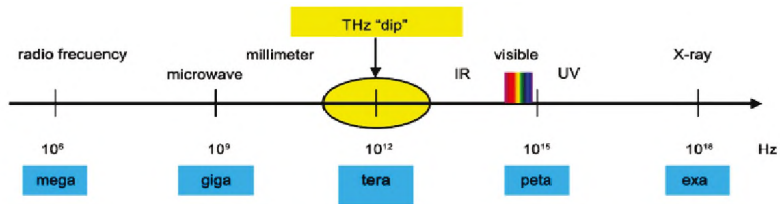


Figure 18 - Electromagnetic spectrum and terahertz “gap”

Until recently, most of the terahertz spectrum f was not used due to the lack of both sources and receivers of coherent radiation in this range. Therefore, the terahertz region of the electromagnetic spectrum was called the “terahertz gap” (Figure 18). With the advent of the first terahertz quantum cascade laser (QCL) in 2002 [85] and the subsequent significant progress in the development of terahertz QCLs, the “terahertz gap” in the electromagnetic spectrum gradually began to close. The most promising approach to creating efficient THz radiation detectors is the use of nanostructures as a sensitive element. Graphene is one of these nanostructures. In [84], a mode of detecting THz radiation using field-effect transistors based on bilayer graphene was demonstrated.

Conclusion. The formula (10) we obtained for sliding friction includes the adhesion energy and therefore it pertains to the molecular theory of friction out of the five existing ones today. The adhesion energy is determined by the surface energy of a solid, which is quite difficult to measure. The model of solid friction we proposed, using the example of relevant substances - graphite and graphene, includes, in addition to the adhesion energy of two rubbing materials, the thickness of the surface layer of this material. This thickness is determined by us by formula (1) and gives values for solids, including graphite and graphene, in the nanometer range, sending us to the field of nanotribology. Nanotribology or molecular tribology is a direction in tribology associated with the theoretical and experimental study of the processes of adhesion, friction, wear and destruction at the atomic

and molecular scales of surface interaction. Its development was restrained, in our opinion, by the fact that the thickness of the surface layer responsible for the friction process could only be determined in a high vacuum on atomically clean surfaces of a limited number of single crystals. Our model, presented in this article, opens a new approach for theoretical and experimental study of processes in nanotribology.

In the future, we will describe friction and destruction of critical units and parts of mechanisms and machines used in industrial enterprises and agriculture of the Republic of Kazakhstan.

This scientific article was published within the framework of the grant funding for 2024-2026 IRN No. AP32488258 "Development of an innovative technology for obtaining graphene by intercalation of graphite with microcluster water and modification of HTSC ceramics with graphene" (the research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan).

References / Список литературы

- 1 Sattler K.D. (Editor). Carbon nanomaterials sourcebook. Graphene, Fullerenes, Nanotubes and Nanodiamonds. - CRC Press. - 2016. - 561 p.
- 2 Swain B.P. (Editor). Nanostructured Materials and their Applications. - Springer Nature Singapore Pte Ltd. - 2021. - 434 p.
- 3 Jayatissa A.H. (Editor). Applications of Nanocomposites. - CRC Press. - 2022. - 263 p.
- 4 Penkov O.V. Graphene. Simulation Methods, Preparation Methods, and their Applications. - Elsevier. - 2020. - 247p.
- 5 Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films // Science. - 2004. - V. 306. - № 5696. - P. 666-669.
- 6 Yurov V., Zhangozin K. About the mechanism of graphite splitting // International independent scientific journal. - 2024. - №58. - P. 29-40.
- 7 Yurov V.M., Zhangozin K.N. At the mechanism of graphite splitting bouby aqueous solutions // Znanstvena misel journal. - 2024. - №86. - P. 41-49.
- 8 Yurov V., Zhangozin K. On the question of stone-weles defects in graphene // International independent scientific journal. - 2024. - №58. - P. 42-53.
- 9 Yurov V., Zhangozin K. Barrier Peierls - Nabarro and migration monovacancies and multivacancies in grapheme // Norwegian Journal of development of the International Science. - 2024. - No 124. - P. 91-95.
- 10 Wang L.F., Ma T.B., Hu Y.Z., Wang H., Shao T.M. Ab initio study of the friction mechanism of fluorographene and graphane // J. Phys. Chem. C. - 2013. - V. 117(24). - P. 12520-12525.
- 11 Yang M.M., Zhang Z.Z., Zhu X.T., Men X.H., Ren G.N. In situ reduction and functionalization of graphene oxide to improve the tribological behavior of a phenol formaldehyde composite coating // Friction. - 2015. - V. 3(1). - P. 72-81.
- 12 Guo Y., Zhang S. The tribological properties of multi-layered graphene as additives

of PAO2 oil in steel-steel contacts // *Lubricants*. - 2016. - V. 4. - P. 30-41.

13 *Chen Z.F., Wang Z., Li X.M., Lin Y.X., Luo N.Q., Long M.Z., Zhao N., Xu J.B.* Flexible piezoelectric-induced pressure sensors for static measurements based on nanowires/graphene heterostructures // *ACS Nano*. 2017. - V. 11(5). - P. 4507-4513.

14 *Li J.J., Ge X.Y., Luo J.B.* Random occurrence of macroscale superlubricity of graphite enabled by tribo-transfer of multilayer graphene nanoflakes // *Carbon*. - 2018. - V. 138. - P. 154-160.

15 *Liu L., Zhou M., Jin L., Li L., Mo Y., Su G., Li X., H. Zhu, Tian Y.* Recent advances in friction and lubrication of graphene and other 2D materials: Mechanisms and applications. Review article // Tsinghua Unnersity Press, Springer, *Friction*. - 2019. - P. 1-18.

16 *Zambudio A., Gnecco E., Colchero J., Perez R., Gomez-Herrero J., Gomez-Navarro C.* Fine defect engineering of graphene friction // *Carbon*. - 2021. - V. 182. - P. 735-741.

17 *Antonov P.V., Restuccia P., Righi M.C. and Frenken J.W.M.* Attractive curves: the role of deformations in adhesion and friction on graphene // *Nanoscale Adv.* - 2022. - V. 4. - P. 4175-4184.

18 *Евсин М.Г.* Реологические и трибологические свойства смазочных композиций, модифицированных фторидом графена // *Глобальная энергия*. - 2023. - Т. 29. - № 3. - С. 124-133. [Yeysin M.G. Rheological and tribological properties of lubricating compositions modified with graphene fluoride // *Global Energy*. - 2023. - Т. 29. - № 3. - S. 124-133.]

19 *Фролов К.В.* Современная трибология: Итоги и перспективы. - М.: Издательство ЛКИ. - 2008. - 480 с. [Frolov K.V. *Modern tribology: Results and prospects*. - M.: LKI Publishing House - 2008. - 480 s.]

20 *Япрынтцев А.Д.* Слоистые гидроксиды редкоземельных элементов (Y, Eu, Gd, Tb) и материалы на их основе: синтез и физико-химические свойства. - Диссертация кандидата химических наук. - Москва. - 2021. - 165 с. [Yapryntcev A.D. *Layered hydroxides of rare earth elements (Y, Eu, Gd, Tb) and materials based on them: synthesis and physicochemical properties*. - Dissertation of candidate of chemical sciences. - Moscow. 2021. - 165 s.]

21 *Браун О.М.* Модель Френкеля - Конторовой. Концепции, методы, приложения. - М.: Физматлит. - 2008. - 536 с. [Braun O.M. *The Frenkel-Kontorova Model. Concepts, Methods, Applications*. - M.: Fizmatlit - 2008. - 536 s.]

22 *Кужаров А.С.* Концепция безызносности в современной трибологии // *Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. - 2014. - № 2. - С. 23-31. [Kuzharov A.S. The concept of wearlessness in modern tribology // *News of universities. North Caucasian region. Technical sciences*. - 2014. - № 2. - S. 23-31.]

23 *Dienwiebel M., Pradeep N., Verhoeven G.S., Zandbergen H.W., Frenken J.W.M.* Model experiments of superlubricity of graphite // *Surf. Sci.* - 2005. - V. 576(1-3). - P. 197-211.

24 *Hod O., Meyer E., Zheng Qu., Urbakh M.* Structural superlubricity and ultralow friction across the length scales // *Nature*. - 2018 - Vol. 563. - P. 485-492.

25 *Erdemir A., Martin J.M., Luo J.* Superlubricity. - Elsevier. - 2021. - 553 p.

26 *Sun X.Y., Qi Y.Z., Ouyang W.G., Feng X.Q., Li Q.Y.* Energy corrugation in atomic-scale friction on graphite revisited by molecular dynamics simulations // *Acta. Mech. Sin.* - 2015. - Vol. 32(4). - P. 604-610.

- 27 Григорьев А.Я., Мышкин Н.К. Твердые смазки // Химия и жизнь. – 2014. - №1. – С. 34-42. [Grigorev A.Ya., Myshkin N.K. Solid lubricants // Chemistry and Life. – 2014. - №1. – С. 34-42.]
- 28 Белогорский В.Д. Антифрикционный графит и его применение в промышленности. - М.: Знание, 1974. - 154 с., [Belgorodskiy V.D. Antifriction graphite and its application in industry. - M.: Knowledge, 1974. - 154 s.]
- 29 Казанкапова М.К., Ермагамбет Б.Т., Касенов Б.К., Наурызбаева А.Т., Касенова Ж.М., Кемелова Б.А. Пористо-углеродные материалы на основе углерод-минерального сырья Казахстана. - Нур-Султан: ТОО «Институт химии угля и технологии». - 2020. - 323 с. [Kazankapova M.K., Yermagambet B.T., Kasenov B.K., Nauryzbayeva A.T., Kasenova Zh.M., Kemelova B.A. Porous carbon materials based on carbon-mineral raw materials of Kazakhstan. - Nur-Sultan: TOO "Institute of Coal Chemistry and Technology". - 2020. - 323 s.]
- 30 Журавлев В.Ф. 500 лет истории закона сухого трения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Естественные науки". – 2014. - № 2. – С. 21-31. [Zhuravlev V.F. 500 years of the history of the law of dry friction // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Natural Sciences". – 2014. - № 2. – С. 21-31.]
- 31 Шалыгин М.Г. Изнашивание субшероховатости поверхностей трения в водородсодержащей среде. – Диссер. доктора технических наук. – Брянск. - 2017. – 235 с. [Zhalygin M.G. Wear of subroughness of friction surfaces in a hydrogen-containing environment. – Dissertation of Doctor of Technical Sciences. – Bryansk. - 2017. – 235 s.]
- 32 Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. - М.: Наука. - 2006. - 490 с.[Oura K., Livshic V.G., Saranin A.A., Zotov A.V., Katayama M. Introduction to Surface Physics. - M.: Nauka. - 2006. - 490 s.]
- 33 Юров В.М. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких кристаллов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. - 2019. - вып. 11. - С. 389-397. [Yurov V.M. Thickness of the surface layer of atomically smooth crystals // Physicochemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. - 2019. - rel. 11. - S. 389-397.]
- 34 Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С. Анизотропия поверхностного слоя d-элементов // Современные наукоемкие технологии. – 2021. - № 2. - С. 88–93. [Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. Anisotropy of the surface layer of d-elements // Modern science-intensive technologies. – 2021. - № 2. - S. 88–93.]
- 35 Yurov V., Zhangozin K. Surface layer thickness, defects and strength of graphite // The scientific heritage, 2023, No 128. – P. 20-27.
- 36 Yurov V.M., Berdibekov A.T., Belgibekov N.A., Makhanov K.M. Friction of high-entropy coatings // Bulletin of KarU. - 2021, - No. 3. - P. 101-114.
- 37 Рехвиашвили С.Ш., Кишტიкова Е.В., Кармокова Р.Ю. К расчету постоянной Толмана // Письма в ЖТФ. – 2007. - Т. 33. - Вып. 2. - С. 1–7.[Rekhviashvili A.Sh., Kishtikova E.V., Karmokova R.Yu. On the calculation of Tolman's constant // Letters to the Journal of Technical Physics. – 2007. -Т. 33. - Rel. 2.- S.1–7.]
- 38 Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С. Исследование первичных нанотрещин атомарно-гладких металлов // Письма в ЖТФ. – 2023. – Т. 49. - вып. 8. - С. 35-38. [Yurov V.M., Goncharenko V.I., Olesho V.S. Study of primary nanocracks in atomically smooth metals // Letters to the Journal of Technical Physics. – 2023. – Т. 49. - rel. 8. - S. 35-38.]
- 39 Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. - М.: Химия. - 1977. – 352 с. [Zimon A.D.

Adhesion of films and coatings. - M.: Chemistry. - 1977. - 352 s.]

40 Xu Q., Li X., Zhang J., Hu Y., Wang H., Ma T. Suppressing nanoscale wear by graphene/graphene interfacial contact architecture: a molecular dynamics study // ACS Appl. Mater. Interfaces. - 2017. - Vol. 9, 40959.

41 Graf D., Molitor F., Ensslin K., Stampfer C., Jungen A., Hierold C., Wirtz L. Spatially resolved Raman spectroscopy of single- and few-layer grapheme // Nano Lett. - 2007. - Vol. 7. - P. 238-242.

42 Zeng X., Peng Y., Lang H., A novel approach to decrease friction of grapheme // Carbon. - 2017. - Vol. 118. - P. 233-240.

43 Shearer C.J., Slattery A.D., Stapleton A.J., Shapter J.G., Gibson C.T., Accurate thickness measurement of graphene // ACS Symp. Ser. - 2016. - Vol. 27, 125704.

44 Gupta A., Chen G., Joshi P., Tadigadapa S., Eklund P.C. Raman scattering from high-frequency phonons in supported n-graphene layer films // Nano Lett. - 2006. - Vol. 6. - P. 2667-2673.

45 Батанов С.С. Структурная химия. Факты и зависимости. - М: Диалог. - МГУ. - 2000. - 292 с. [Batsanov S.S. Structural chemistry. Facts and dependencies. - M: Dialog. - MSU. - 2000. - 292 s.]

46 Уваров Н.Ф., Болдырев В.В. Размерные эффекты в химии гетерогенных систем // Успехи химии. - 2001. - Т. 70 (4). - С. 307-329. [Uvarov N.F., Boldyrev V.V. Size effects in the chemistry of heterogeneous systems // Advances in Chemistry - 2001. - Т. 70 (4). - S. 307-329.]

47 Шикин А.М., Адамчук В.К. Квантово-размерные эффекты в тонких слоях металлов на поверхности монокристаллов и их анализ // Физика твердого тела. - 2008. - Т. 50. - №6. - С. 1121-1137. [Shikin A.M., Adamchuk V.K. Quantum-size effects in thin layers of metals on the surface of single crystals and their analysis // Solid State Physics - 2008. - Т. 50. - №6. - S. 1121-1137.]

48 Новоселов К.С. Графен: материалы Флатландии // Успехи физических наук. - 2011. - Т. 181. - № 12. - С. 1299-1311. [Novoselov K.S. Graphene: materials of Flatland // Advances in Physical Sciences. - 2011. - Т. 181. - № 12. - S. 1299-1311.]

49 Шебзухова И.Г. Поверхностные энергия и натяжение металлических кристаллов, кинетика адсорбции компонентов бинарных систем. - Диссертации доктора физ.-мат. наук. - Нальчик. 2013. - 370 с. [Shebzukhova I.G. Surface energy and tension of metallic crystals, kinetics of adsorption of components of binary systems. - Dissertations of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. - Nalchik. - 2013. - 370 s.]

50 Федоров В.Т., Кокоев М.Н. Поверхностная энергия в процессах измельчения твердых тел // Вестник Дагестанского ГТУ. Технические науки. - 2023. Т. 50(3). - С. 181-189. [Fedorov V.T., Kokoev M.N. Surface energy in the processes of grinding solids // Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences. - 2023. Т. 50(3). - S. 181-189.]

51 Wang S., Zhang Y., Abidi N., Cabrales L. Wettability and surface free energy of graphene films // Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids. - 2009. - Vol. 25 - No. 18 - P. 11078-11081.

52 Su R., Zhang X. Wettability and Surface Free Energy Analyses of Monolayer Graphene // Journal of Thermal Science. - 2018. - Vol. 27(5934). - P. 1-5.

53 Ferguson A. The Surface Energetics of Low Dimensional Nanomaterials. - A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy. - Trinity College Dublin. - 2016. - 188 p.

- 54 Rohman N., Mohiuddin T., Al-Rugeishi M. Surface free energy of graphene-based coatings and its component elements // Inorganic Chemistry Communications. – 2023. - Vol. 153(4). – P. 10855-110855.
- 55 Al-Rugeishi M.S., Mohiuddin T., Al-Amri Kh., Rohman N. Graphene Surface Energy by Contact Angle Measurements // Arabian Journal for Science and Engineering. – June 2022. – P. 1-6.
- 56 Obreimoff J.W. The splitting reigth of mica // Proc. Roy. Soc., 1930. - V. A127. -P. 290-293.
- 57 Johnson M., Brodnik N.R., Ekeh T., Bhattacharya K. Obreimoff revisited: Controlled heterogeneous fracture through the splitting of mica // Mechanics of Materials. – 2019. - V. 136(01). 103088.
- 58 Wan K.-T., Aimard N., Lathabai S., Horn R.G., Lawn B.R. Interfacial energy states of moisture-exposed cracks in mica // J. Mater. Res. – 1990. - V. 5(1). – P. 172-182.
- 59 Wan K.-T., Smith D.T., Lawn B.R. Fracture and contact adhesion energies of mica-mica, silica-silica, and mica-silica interfaces in dry and moist atmospheres // J. Am. Ceram. Soc. – 1992. - V. 75(3). – P. 667-676.
- 60 Yurov V., Zhangozin K. About the mechanism of mica splitting // Sciences of Europe. – 2024. – No. 133. – P. 97-104.
- 61 Ножкина А.В. Костиков В.И. Поверхностная энергия алмаза и графита // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент - техника, технология его изготовления и применения. - 2017. - Вып. 20. С. 161–167. [Nozhkina A.V., Kostikov V.I. Surface energy of diamond and graphite // Rock-destroying and metalworking tool - technique, technology of its manufacture and application. . - 2017. - Rel. 20. S. 161–167.]
- 62 Турчанинов М.А. Механизмы кристаллизации жидкого углерода, полученного при плавлении графита импульсом лазера в газовых средах с давлением ~10 МПа. - Диссертация кандидата физ.-мат. наук. – Москва. - 2010. - 128 с. [Turchninov M.A. Mechanisms of crystallization of liquid carbon obtained by melting graphite with a laser pulse in gas environments with a pressure of ~10 MPa. - Dissertation of candidate of physical and mathematical sciences. . – Moskow. - 2010. - 128 s.]
- 63 Jiang Q. and Chen Z.P. Thermodynamic phase stabilities of nanocarbon // Carbon. - 2006. - Vol. 44, iss. 1. - P. 79-83.
- 64 Сенютъ В.Т., Витязь П.А., Парницкий А.М. Термодинамический анализ процесса формирования наноструктурного поликристаллического материала на основе наноалмазов, модифицированных не алмазным углеродом (часть 2) // Механика машин, механизмов и материалов. - 2023. - № 4(65). – С. 76-84. [Senyt' V.T., Vityaz' P.A., Parnitskiy A.M. Thermodynamic analysis of the process of formation of nanostructured polycrystalline material based on nanodiamonds modified with non-diamond carbon (part 2) // Mechanics of machines, mechanisms and materials. - 2023. - № 4(65). – S. 76-84.]
- 65 Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181. - №3. – С. 233-268. [Yeleckiy A.V., Iskandarova I.M., Knuzhnik A.A., Krasikov D.N. Graphene: methods of production and thermophysical properties // Advances in Physical Sciences. – 2011. – Т. 181. - №3. – С. 233-268.]
- 66 Verkholomov V.K. Physical Features of the New Equation (Equation Jung - Verkholomov) of Contact Angle. // Materials of the XII international research and practice conference “Science,

Technology and Higher Education". December 21-22. - 2016. - Westwood, Canada. - P. 97-110.

67 Гиббс Дж.В. Термодинамические работы. - М. - Л.: ГИТТЛ. - 1950. - 303 с. [Gibbs D.V. Thermodynamic works. - M. - L.: GITTL. -1950. - 303 s.]

68 Хоконов Х.Б., Таова Т.М., Алчагиров Б.Б. Поверхностная энергия и поверхностное натяжение металлов и их бинарных сплавов в твердом состоянии // КБГУ. – 2019. – Т. IX. - № 2. – С. 5-19. [Khokonov H.B., Taova N.M., Alchagirov B.B. Surface energy and surface tension of metals and their binary alloys in the solid state // KBSU. – 2019. – Т. IX. - № 2. – С. 5-19.]

69 Wang C., Lan L., Liu Y., Tan H. Defect guided wrinkling in graphene // Comput. Mater. Sci. – 2013. – Vol. 77. – P. 250-253.

70 Zhang T., Li X., Gao H. Defects controlled wrinkling and topological design in graphene // J. of the Mechanics and Physics of Solids. – 2014. - Vol. 6-7. – P. 2-13.

71 Баимова Ю.А., Жоу К. Взаимодействие индентора атомно-силового микроскопа с морщинами на графеновых нанолентах // Письма о материалах. – 2012. - Т.2. - С. 139-142. [Baimova Yu.A., Zhou K. Interaction of an atomic force microscope indenter with wrinkles on graphene nanoribbons // Letters on Materials. – 2012. - Т.2. - S. 139-142.]

72 Ахунова А.Х., Баимова Ю.А. Влияние дислокационных диполей с разным плечом на деформационное поведение графена: молекулярная динамика // Журнал технической физики. – 2023. - том 93. - вып. 4. – С. 445-452. [Ahunova A.H., Baimova Yu.A. The influence of dislocation dipoles with different shoulders on the deformation behavior of graphene: molecular dynamics // Journal of Technical Physics. – 2023. – Т. 93. - Rel. 4. – S. 445-452.]

73 Катин К.П. Влияние механических деформаций на электронные свойства и адсорбционную способность графена и родственных углеродных наноструктур. - Диссертация доктора физ.-мат. наук. – Москва. – 2020. – 236 с. [Katin K.P. The influence of mechanical deformations on the electronic properties and adsorption capacity of graphene and related carbon nanostructures. - Dissertation of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. - Moscow. - 2020. – 236 s.]

74 Голоудина С.И., Лучинин В.В., Пасюта В.М. и др. Получение высокопроводящих и оптически прозрачных пленок со структурой мультиграфена путем карбонизации полиимидных пленок Ленгмюра–Блоджетт // Письма в ЖТФ. – 2019. - том 45. - вып. 9. С. 50-54. [Goloudina S.I., Luchinin V.V., Gfcyuta V.M and az. Obtaining highly conductive and optically transparent films with a multigraphene structure by carbonization of Langmuir-Blodgett polyimide films // Letters to the Journal of Technical Physics. – 2019. – Т.45. – rel. 9. – S. 50-54.]

75 Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. and Ryapukhin A.V. Calculating the Surface Layer Thickness and Surface Energy of Aircraft Materials // Inventions. – 2023. - V.8. - №66. - P. 2-15.

76 Панин В.Е., Колубаев А.В., Слосман А.И., Тарасов С.Ю., Панин С.В., Шаркеев Ю.П. Износ в парах трения как задача физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. – 2000. - Т.3. - № 1. – С.67-74. [Panin V.E., Kolubaev A.V., Slosman A.I., Tarasov S.Yu., Panin S.V., Sharkeev Yu.P. Wear in friction pairs as a problem of physical mesomechanics // Physical mesomechanics. – 2000. - Т.3. - № 1. – С.]

77 Ким В.А., Каримов Ш.А. Проявление физической мезомеханики при контактном взаимодействии, трении и изнашивании // Ученые записки КнАГТУ, 2014, №11-1(18). –

- C. 5-9. [Kim V.A., Karimov Sh.A. Manifestation of physical mesomechanics during contact interaction, friction and wear // Scientific notes of KnAGTU, 2014, №11-1(18). – S. 5-9.]
- 78 Юров В.М., Гученко С.А. Толщина поверхностного слоя высокоэнтропийных покрытий CrNiTiZrCu // Национальная ассоциация ученых. 2019, – № 44, Ч.1. – С. 40-44. [Yurov V.M., Guchenko S.A. Thickness of the surface layer of high-entropy CrNiTiZrCu coatings // National Association of Scientists. 2019, – № 44, P.1. – S.40-44.]
- 79 Гершуни Г.З., Жуховницкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. - М.: Наука. - 1972. - 232 с. [Gershuni G.Z., Zhukhovnitsky E.M. Convective stability of incompressible fluid. - M.: Nauka. 1972. - 232 s.]
- 80 Константинова Т.Е. Эволюция дислокационной структуры металлических систем в условиях высоких давлений // Физика и техника высоких давлений. – 2009. - том 19. - № 1. – С. 7-30. [Konstantinova T.E. Evolution of the dislocation structure of metallic systems under high pressure conditions // Physics and technology of high pressures. – 2009. – T.19. - № 1. – S. 7-30.]
- 81 Белецкий А.Я. Электронные поверхностные состояния в кристаллах // УФН. 1981. Том 134. вып. 1. – С. 125-147. [Belenkiy A.Ya. Electronic surface states in crystals // UFN.1981. T.134. rel. 1. – S.125-147.]
- 82 Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. - 2011. - 75 с. [Tsarev M.V. Generation and registration of terahertz radiation by ultrashort laser pulses. - Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University. - 2011. - 75 s.]
- 83 Баимова Ю.А. Структура и физические свойства наноматериалов на основе графена. - Диссертация доктора физ.-мат. наук. – Уфа. – 2016. – 308 с. [Baimova Yu.A. Structure and physical properties of graphene-based nanomaterials. - Dissertation of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. – Ufa. - 2016. – 308 s.]
- 84 Гайдученко И.А. Асимметричные устройства на основе углеродных нанотрубок и графена как детекторы терагерцового диапазона. - Диссертация кандидата физ.-мат. наук. – Долгопрудный. - 2019. - 192 с. [Gaiduchenko I.A. Asymmetric devices based on carbon nanotubes and graphene as terahertz detectors. - Dissertation of candidate of physical and mathematical sciences. - Dolgoprudny. - 2019. - 192 c.]
- 85 Kohler R., Tredicucci A., Beltram F., Beere H.E. Linfeld E.H. et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser // Nature. – 2002. - V. 417. - №. 6885. - С. 156-192.

Юров В.М.¹, Жанғозин К.Н.¹, Каргин Д.Б.²

¹ТСК-Восток, Караганда қ., Астана қ., Қазақстан

²Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ, Қазақстан

ГРАФИТ ПЕН ГРАФЕННІҢ ҮЙКЕЛУ МЕХАНИЗМІ

Түйіндеме. Мақалада графен парақтарының бумасы болатын графиттің үйкеліс моделі ұсынылған. Модель графит үшін графеннің 3 моноқабатын құрайтын беткі қабаттың қалыңдығына негізделген. Беткі қабатта дислокациялар мен наножарықтардың пайда болуына алып келетін үлкен ішкі кернеулер пайда болады. Үйкеліс процесін беткі қабаттың серпімді-пластикалық деформация процесі ретінде сипаттауға болады. Графен үшін графитпен үйкеліс кезінде кванттық наноқұрылым болып

табылатын наноқабат маңызды рөл атқарады. Графеннің үйкелісі бетінің Тамм күйлерін ескере отырып, сатылы түрде жүреді. Үйкеліс кезінде тербелмелі және диссипативті процестер жүріп, турбулентті фрагмент түзілетіні, Бенар ұяшықтары түрінде өзіндік ұйымдасу жүретіні көрсетілген. Графеннен немесе оның композиттерінен жасалған антифрикциялық жабынды таңдау критерийі бола алатын формула алынды. Графенде біз болжаған терагерц сәулеленуі беттік плазмон поляритондарына (плазмондарға) жатады. Терагерц сәулеленуінің тиімді детекторларын құрудың ең перспективалы тәсілі наноқұрылымдарды сезімтал элемент ретінде пайдалану болып табылады.

Бұл наноқұрылымдарға графен және графен тәрізді материалдар кіреді. Ұсынылып отырған модель нанотрибологиядағы процестерді теориялық және эксперименттік зерттеуге жаңа көзқарасты ашады.

Түйінді сөздер: антифрикциялық жабын, графен композиттері, наноқұрылымдар, нанотрибологиядағы процестер, графен материалдары, графит, 2D графен үйкелісі, наноэлектроника.

* * *

Юров В.М.¹, Жанғозин К.Н.¹, Каргин Д.Б.²

¹ТСК-Восток», г. Караганда, г. Астана, Казахстан

²Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, г. Астана, Казахстан

МЕХАНИЗМ ТРЕНИЯ ГРАФИТА И ГРАФЕНА

Аннотация. В статье предложена модель трения графита, представляющего собой стопку графеновых листов. В основе модели лежит толщина поверхностного слоя, которая для графита составляет 3 монослоя графена. В поверхностном слое возникают большие внутренние напряжения, приводящие к возникновению дислокаций и нанотрещин. Процесс трения можно описывать как процесс упругопластической деформации поверхностного слоя. Для графена при трении по графиту важную роль играет нанослой, который представляет собой квантовую наноструктуру. Трение графена происходит ступенчатым способом, с учетом таммовских состояний поверхности. Показано, что при трении происходят колебательные и диссипативные процессы, образование турбулентного фрагмента, самоорганизация в виде ячеек Бенара. Получена формула, которая может служить критерием выбора антифрикционного покрытия из графена или из его композитов. Предсказанное нами в графене, терагерцевое излучение относится к поверхностным плазмонам - поляритонам (плазмонам). Самым перспективным подходом к созданию эффективных детекторов терагерцового излучения является использование наноструктур в качестве чувствительного элемента. К этим наноструктурам относится и графен и графеноподобные материалы. Предложенная модель открывает новый подход для теоретического и экспериментального исследования процессов в нанотрибологии.

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, композиты графена, наноструктуры, процессы в нанотрибологии, графеновые материалы, графит, трение 2D-графена, наноэлектроника.

Information about the authors

Yurov Viktor Mikhaylovich – Leading researcher of TSK-Vostok, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, TSK-Vostok, Karaganda c., Astana c., Kazakhstan, exciton@list.ru

Jangozin Kanat Nakoshevich – Leading researcher of TSK-Vostok, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, TSK-Vostok, Karaganda c., Astana c., Kazakhstan, 4kzh@mail.ru

Kargin Djumat Beysenbekovich – candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Technology Commercialization, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Almaty c., Kazakhstan, kargin_db@enu.kz

Авторлар туралы мәліметтер

Юров Виктор Михайлович – ТСК-Восток жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, ТСК-Восток, Қарағанды қ, Астана қ, Қазақстан, exciton@list.ru

Жангозин Канат Накошевич – ТСК-Восток жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, ТСК-Восток, Қарағанды қ, Астана қ, Қазақстан, 4kzh@mail.ru

Каргин Джумат Бейсенбекович – физика-математика ғылымдарының кандидаты, технологияны коммерцияландыру кафедрасының доценті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Алматы қ, Қазақстан, kargin_db@enu.kz

Сведения об авторах

Юров Виктор Михайлович – ведущий научный сотрудник, «ТСК-Восток», кандидат физико-математических наук, доцент, ТСК-Восток», г.Караганда, г. Астана, Казахстан, exciton@list.ru

Жангозин Канат Накошевич – ведущий научный сотрудник, «ТСК-Восток», кандидат физико-математических наук, доцент, ТСК-Восток», г.Караганда, г. Астана, Казахстан, 4kzh@mail.ru

Каргин Джумат Бейсенбекович – кандидат физико-математических наук, доцент, департамент коммерциализации технологий Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Алматы, Казахстан, kargin_db@enu.kz

ПЕРЕВОД СТАТЬИ / МАҚАЛАНЫҢ АУДАРМАСЫ

Юров В.М.¹, Жангозин К.Н.¹, Каргин Д.Б.²

¹ТСК-Восток, г. Караганда, Казахстан

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

МЕХАНИЗМ ТРЕНИЯ ГРАФИТА И ГРАФЕНА

Аннотация. В статье предложена модель трения графита, представляющего собой стопку графеновых листов. В основе модели лежит толщина поверхностного слоя, которая для графита составляет 3 монослоя графена. В поверхностном слое возникают большие внутренние напряжения, приводящие к возникновению дислокаций и нанотрещин. Процесс трения можно описывать как процесс упругопластической деформации поверхностного слоя. Для графена при трении по графиту важную роль играет нанослой, который представляет собой квантовую наноструктуру. Трение графена происходит ступенчатым способом, с учетом таммовских состояний поверхности. Показано, что при трении происходят колебательные и диссипативные процессы, образование турбулентного фрагмента, самоорганизация в виде ячеек Бенара. Получена формула, которая может служить критерием выбора антифрикционного покрытия из графена или из его композитов. Предсказанное нами в графене, терагерцевое излучение относится к поверхностным плазмонам - поляритонам (плазмонам). Самым перспективным подходом к созданию эффективных детекторов терагерцового излучения является использование наноструктур в качестве чувствительного элемента. К этим наноструктурам относятся и графен и графеноподобные материалы. Предложенная модель открывает новый подход для теоретического и экспериментального исследования процессов в нанотрибологии.

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, композиты графена, наноструктуры, процессы в нанотрибологии, графеновые материалы, графит, трение 2D-графена, наноэлектроника.

Введение. За последние три десятилетия нульмерные (0D), одномерные (1D) и двумерные (2D) углеродные наноматериалы привлекли значительное внимание из-за их уникальных электронных, оптических, тепловых, механических и химических свойств [1-3]. Трение и износ являются характеристиками механических систем, имеющих контакт между движущимися компонентами. Здесь особую роль играет 2D-графен и его композиты [4]. Графен обладает высокими уровнями жесткости, прочности и теплопроводности и является также непроницаем для газа. Графен считается перспективным материалом для применения в наноэлектронике и миниатюризации различных устройств. Помимо твердой смазки, графеновые материалы могут использоваться для совершенствования различных видов композиционных материалов от полимеров до керамик. Они также продемонстрировали свою эффективность в качестве нанодобавок для различных видов

смазок, таких как вода, масла и ионные жидкости. Минимальное количество графеновой добавки может повысить долговечность изделия. Графен был открыт 20 лет тому назад [5]. Исследованию графена посвящено много работ в большинстве стран, включая механизмы его получения [6, 7] и его дефектную структуру [8, 9].

Цель работы – дать обзор последних работ по трению 2D-графена и предложить нашу модель по трению однослойного и многослойного графена (графита).

Обзор по трению графена. Двумерные 2D – графеновые материалы и их композиты являются новыми наноматериалами для применения в технологических и инженерных областях [10-18]. В настоящее время существует пять теорий, объясняющих процессы, происходящие при трении: механическая (деформационная); молекулярная (адгезионная); молекулярно-механическая; энергетическая; гидродинамическая [19]. В обзоре [15] трение слоистых структур подразделяется на механизмы: межслоевой и поверхностный (рисунок 1).

Низкое трение слоистых материалов было отмечено еще в 30-х годах прошлого столетия за счет низкого сопротивления сдвигу между их соседними атомными слоями (рисунок 1-1). Например, к ним относятся: мусковит (слюда) – $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; графит (C); дихалькогениды переходных металлов - MX_2 ($\text{M} = \text{Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Bi, Mo, W; X} = \text{S, Se, Te}$); карбиды и нитриды металлов, MAX- и MXene-фазы и многие другие [20]. По модели Томлинсона (рисунок 1-2) сила трения зависит от фактической площади контакта, то есть от шероховатости двух трущихся материалов, без учета их атомного строения [15]. По модели Френкеля – Конторовой (рисунок 1-3) трение возникает за счет движения дислокаций в кристалле, возникающих при движении двух трущихся материалов. При этом любое возбуждение в кристалле превращается в бегущие волны, которые в непрерывной модели называют солитонами [21]. Hirano et al. (1991г.) изучили атомарно гладкие поверхности и получили на них коэффициенты трения близкие к нулю [15]. Этот феномен они называли «суперсмазкой» или сверхсмазкой (рисунок 1-4). Однако суперсмазка была открыта в 1956 г. Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским на системе «медный сплав - глицерин - сталь» и названа ими эффектом безызносности [22]. Механизм эффекта безызносности при трении не следует из пяти теорий трения (смотри выше), практикующих в настоящее время, и дискутируется до настоящего времени.

В работе [23] изучили рассеяние энергии между вольфрамовым наконечником скольжение по графитовой поверхности методом АСМ. Измеряя трение атомного масштаба как функцию угла поворота между двумя контактирующими телами, в статье показали, что причина сверхнизкого трения графита заключается в несоизмеримости повернутых слоев графита – эффект под названием: «сверхсмазывающая способность» (рисунок 1-5). В обзоре [24] была дана хронология основных вех в области сверхсмазывающей способности (рисунок 2).



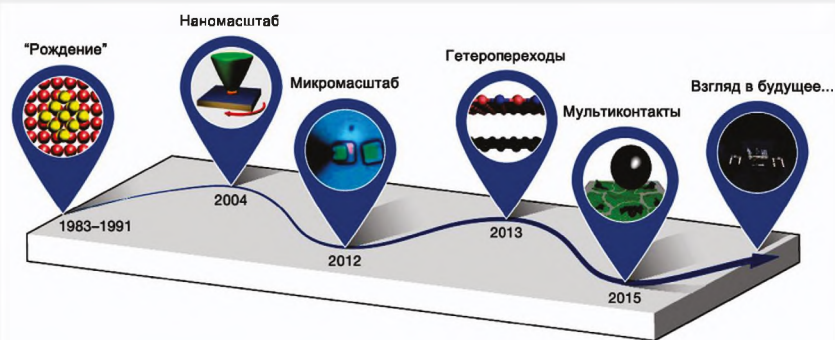


Рисунок 2 - Хронология основных вех в области структурной сверхсмазывающей способности

График начинается с первого теоретического предсказания исчезновения статического трения, сделанного в 1983г. и исследование состояний сверхнизкого кинетического трения в 1991г. («Рождение»). Этап, за которым последовала новаторская экспериментальная демонстрация наноразмерных сверхсмазывающей способности графитовых контактов в 2004г., что привело к первому наблюдению микромасштабной сверхсмазывающей способности в 2012г. и предположение гетеропереходов в 2013г. и многоконтактных конфигураций в 2015г. [24].

В отличие от других критических явлений, таких как сверхпроводимость и сверхтекучесть, трение, связанное с рассеиванием энергии, никогда не исчезает. В связи с этим, критерий для сверхсмазывающей способности обычно выбирают как уменьшение коэффициента трения (производная силы трения к нормальной нагрузке) менее $k \approx 10^{-3}$ - 10^{-4} . Для низкого коэффициента трения была придумана модель коробки для яиц (рисунок 1-6). Суть этой модели заключается в том, что в слоистых структурах рассматриваются две цепочки атомов размером V_0 . Первая из них скользит по второй с некоторым потенциалом и параметром $\eta = 4\pi V_0 / (k a^2)$. Как только $\eta = 1$, то могут образовываться локально соизмеримые области, что приводит к эффектам закрепления и усилению трения. Отсюда делается вывод, что сверхнизкое трение (сверхсмазка) возникает, когда поверхности в контакте несоизмеримы (рисунок 3) [15, 24].

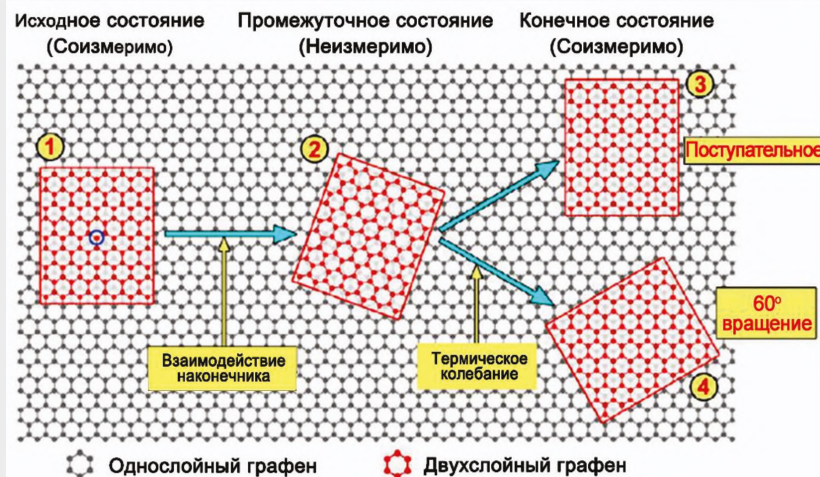


Рисунок 3 - Процесс преобразования соизмеримого-несоизмеримого состояния при скольжении графеновых нанолент по поверхности графена [15].

Частицы на поверхности при трении могут быть соизмеримыми и несоизмеримыми с расположением атомов поверхности. Это различие особенно видно из спектров колебаний движущихся частиц. В соизмеримых структурах атомные частицы находятся в вполне определенных элементарных ячейках кристалла. Спектр колебаний атомов в двумерной структуре определяется потенциалом их взаимодействия и имеет дальний порядок (оптическую ветвь колебаний). Несоизмеримые структуры возникают тогда, когда энергия латерального взаимодействия атомных частиц превышает величину активационного барьера. При этом в спектре колебаний появляется акустическая ветвь, а атомные частицы занимают места, не коррелированные с рельефом подложки. Подробное рассмотрение эффекта суперсмазки дано в монографии [25].

В работе [15] отмечается (рисунок 1-7), что метод МДМ и двухтемпературный метод (ТТМ) подтверждает, что электрон-фононное взаимодействие в графене незначительно влияет на трение по сравнению с шероховатостью подложки. Состояние подложки имеет существенное значение и влияет на силу трения 2D материалов. Когда зонды АСМ скользят по поверхности слабо прикрепившейся подложки сила трения велика из-за деформации графена в виде морщин (рисунок 1-8). Однако, было обнаружено, что механически очищенный графен обеспечивает низкое трение на атомарно гладкой подложке типа слюды, где графен подавляет деформацию поверхностных морщин. Пенков О.В. [4] рассмотрел трибологические свойства графена и пришел к выводу, что ключевые факторы, влияющие на трибологические свойства - это количество слоев, режим укладки и материал подложки.

Для механизма рассеяния энергии (рисунок 1-9) в работе [26] представлена имитационная модель, показанная на рисунке 4а, б. Алмазный наконечник использовался для скольжения по трехслойной графитовой подложке и результирующая энергия трения была записана постоянно во время моделирования. Сферический алмаз с острием радиусом $R = 200 \text{ \AA}$ и высотой $h = 8 \text{ \AA}$ удерживался и перемещался горизонтально вдоль графитовой поверхности. Предполагалось, что несколько верхних слоев наконечника (толщиной $2 \text{ \AA}$) была жесткой, а нижняя часть была задана деформируемой. Для моделирования верхняя поверхность алмазного наконечника имела ориентацию вдоль направления $[100]$. Графитовая подложка содержит три слоя графена длиной $266 \text{ \AA}$ и шириной $245 \text{ \AA}$. Координаты выбирались: ось Z была перпендикулярна графиту, Ось X проходит в зигзагообразном направлении, а ось Y - вдоль направление кресла (рисунок 4а.) Слой графена был закреплен. Два верхних слоя графена также были зафиксированы, чтобы избежать скольжения между слоями.

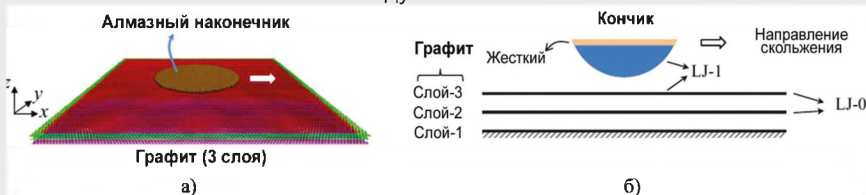


Рисунок 4 - Имитационная модель: атомистическая модель, используемая при моделировании молекулярной динамики (а); схема, показывающая систему алмаз-графит и их специфические взаимодействия (б) [26].

При МД-моделировании использовались два потенциала Леннарда-Джонса (LJ) для описания атомных взаимодействий между алмазным наконечником и графитом (LJ-1) и между разными слоями графита (LJ-0). Потенциал LJ формулируется как $U(r) = 4\epsilon[(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6]$, где ϵ - глубина потенциальной ямы, а σ - расстояние, на котором потенциал равен нулю. В статье [26] исследовалось трение, когда адгезия была относительно слабой ($\lambda = 0,5$). На рисунке 5а показано два типа энергии: U_{int} - энергия, связанная со скольжением алмазного наконечника по поверхности; U_{bulk} - энергия, связанная с деформацией объема. Изменение силы трения F_f как функция нормальной нагрузки представлена на рисунке 5б.

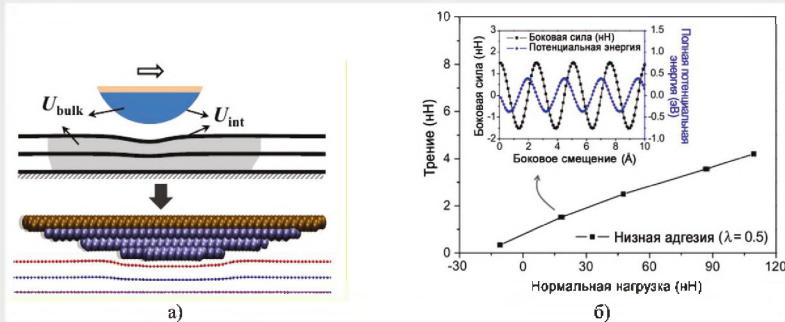


Рисунок 5 - Схема и типичный результат моделирования деформированной конфигурации для систем с низкой адгезией (а); изменение силы трения F_f в зависимости от нормальной нагрузки. На вставке показано изменение боковой силы и потенциальной энергии как функция бокового смещения под действием нормальной нагрузки 18,3 нН [26].

Когда сцепление наконечника с графитом относительно сильное ($\lambda=5$), изменение силы трения F_f в зависимости от нормальной нагрузки равно, как показано на рисунке 6б. Изменения боковой силы и полной потенциальной энергии системы как функции латерального смещения при типичной нормальной нагрузке показано на вставке. Подобно случаю низкой адгезии энергетическая гофра U_{total} также оказывается периодической и очень близкой к синусоидальной форме. Результат моделирования показал, что высокой адгезии происходит расслоение нескольких верхних слоев графита, как показано на рисунок 6а.

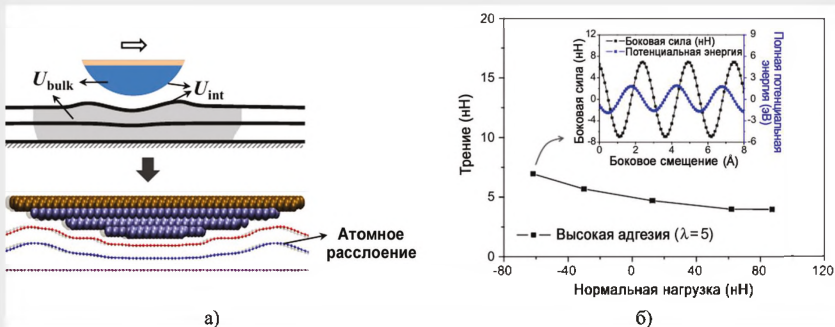


Рисунок 6 - Схема и типичный результат моделирования деформированной конфигурации для систем с высокой адгезией (а); изменение силы трения F_f в зависимости от нормальной нагрузки. На вставке показано изменение боковой силы и полной потенциальной энергии системы как функции бокового смещения при нормальной нагрузке -61,8 нН (б) [26].

Рассеяние энергии (рисунок 1-9), связанное с фрикционным скольжением, происходит не только от межфазного взаимодействия, но и от деформации внутри слоистых материалов.

Использование калиброванной решетки в качестве подложки позволило измерить коэффициент трения графена, который менялся от 0,066 до 0,087. Периодичность трения также объяснялась атомистической несоизмеримостью. Наиболее существенное снижение трения произошло при изменении количества слоев графена с одного на два. Это означает, что как минимум два слоя графена необходимы для обеспечения твердой смазывающей способности за счет скольжения слоев графена друг относительно друга. Когда наночешуйка графена скользила по графиту при низкой температуре (всего 5 K), она проявляла состояние сверхсмазывающей способности. В частности, 100%-ная сверхсмазывающая способность наблюдалась для площадей контакта менее 1×10^6 нм², а вероятность падала до 58% и 12% когда площадь контакта была увеличена до 3×10^6 и 1×10^8 нм². Если площадь контакта превышала 4×10^8 нм², сверхсмазывающая способность графена полностью исчезала. Был сделан вывод, что сдвиг происходит преимущественно по границам зерен [4].

Несмотря на наноразмерную толщину слоев графена, они эффективно снижают трение и износ не только на нано-, но и на макроуровне. Ключевыми факторами, влияющими на трение и износ, являются количество слоев и адгезия к основе. Два последних фактора в основном связаны со специфическими методами осаждения. Наилучшие результаты можно получить, когда графен выращивался на жесткой подложке и оставался нетронутым [4].

Наша модель по трению графита и графена. Многослойный графен или графит представляет слоистую 3D-структуру. Каждый этот слой состоит из правильных шестиугольников атомов углерода (C) размером 0,335 нм, между которыми действуют сильные ковалентные связи с энергией 170 Дж/моль. Между слоями расположено пространство размером 0,7-1,6 нм, где действуют слабые силы Ван-дер Ваальса с энергией 16,7 Дж/моль (рисунок 7а). Эти графеновые слои легко скользят в продольном направлении и представляют собой твердую смазку (рисунок 7б) [27].

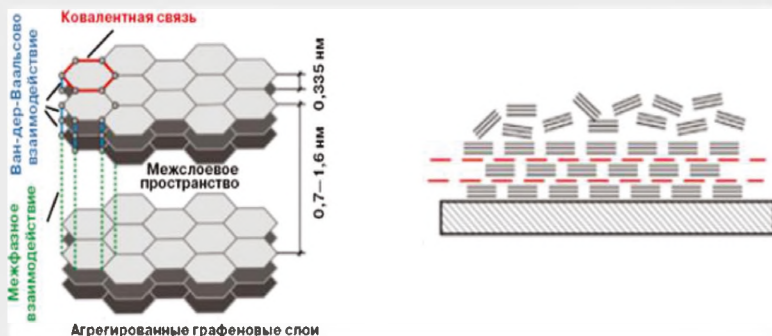


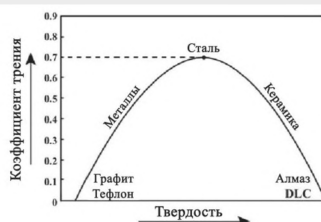
Рисунок 7 - Структура графита (а) и схема слоя на металле (пунктир означает плоскость легкого сдвига) (б) [27].

Уже давно используется антифрикционный графит и его применение в промышленности [28]. В Казахстане углеродным материалам посвящена монография [29].

В периодической таблице Менделеева Д.И. показано положение углерода в центральном столбце и верхнем ряду (рисунок 8а). В центральном столбце углерод имеет наибольшее количество ковалентных связей на атом (4). Верхняя позиция делает его атомы самыми маленькими среди всех элементов центрального столбца. На рис. 8б представлена зависимость коэффициента трения от твердости. Как видно у алмаза коэффициент трения равен около 0,1, как и у графита.

Li	Be	B	C	N	O	F
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At

а)



б)

Рисунок 8 - Таблица Менделеева Д.И., показывающая материалы с атомными связями. В эту таблицу не включены водород и благородные газы (а); коэффициент трения как функция твердости (б).

Сейчас стало общеизвестным, что трение связано с поверхностным слоем твердого тела [30, 31]. Определить толщину этого

слоя $R(l)$ экспериментально – задача сложная, требующая сверхвысокого вакуума и сложной аппаратуры [32]. Эта задача решена лишь для немногих веществ. Например, для золота $R(l) = 1,2$ нм, а для кремния - $R(l) = 3,2$ нм [32], т.е. они представляют собой наноструктуру. Толщину поверхностного слоя твердых тел мы впервые определили в работах [33-35] (рисунок 9а), а трение в работе [36] (рисунок 9б).

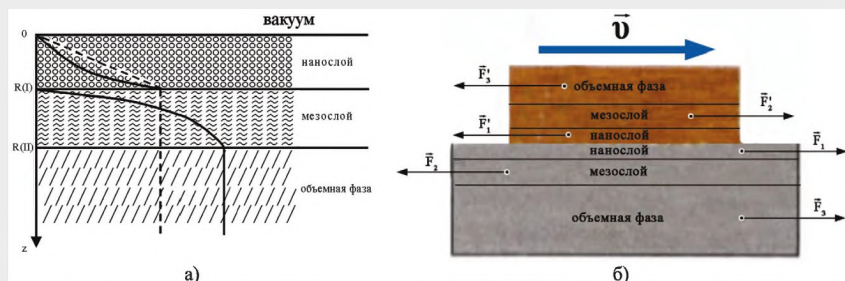


Рисунок 9 - Схема твердого тела: нанослой → мезослой → объемная фаза (а); схема движения атомарно-гладкого графита по атомарно-гладким поверхностям металла с постоянной скоростью u .

Толщина поверхностного слоя $R(l)$ дается формулой [33-35]:

$$R(l) = 0,17 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha \cdot v \text{ [м]}. \quad (1)$$

В уравнении (1) нужно знать один параметр – молярный объем элемента, который равен $v = M/\rho$ (M – молярная масса, ρ – ее плотность), $\alpha = 1 \text{ м}^{-2}$ – постоянная, чтобы соблюдалась размерность ($R(l) \text{ [м]}$). В работе [37] показано, что поверхностная энергия объемного металла γ_2 с точностью до 3% равна:

$$\gamma_2 = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \text{ [J/м}^2\text{]}, \quad (2)$$

где T_m - температура плавления металла (К).

В слое $R(l)$ нужно учесть размерный эффект и поверхностная энергия становится равной γ_1 [38]:

$$\gamma_1 = \gamma_2(1 - R(l)/R(l) + h) \approx 0,5\gamma_2; \quad (3)$$

где γ_{12} – поверхностная энергия на границе раздела фаз, которая пренебрежимо мала, в силу фазового перехода II рода.

Чтобы разделить слой $R(l)$ от остального кристалла, нужно затратить энергию, которая называется энергией адгезии [39]:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \approx \gamma_1 + \gamma_2. \quad (4)$$

Внутренние напряжения σ_{is} между фазами γ_1 и γ_2 можно просчитать по формуле [39]:

$$\sigma_{is} = \sqrt{W_a \cdot E / R(I)}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости Юнга.

Используя уравнения (1)-(5), вычислим параметры для графита и графена.

Таблица 1 - Параметры R(I) графита и графена

Углерод	M, г/моль	ρ , г/см ³	R(I) _a , нм	R(I) _c , нм	γ_a мДж/м ²	γ_c мДж/м ²
Графит	12,0107	2,26	0,900 (3)	2,46 (3)	2195	130
Графен	12,0107	2,26	0,246 (1)	0,14 (1)	2652	-

Из таблицы 1 следует, что толщина поверхностного слоя у графита равна 0,9 и 2,46 нм, т.е. они представляют собой наноструктуру. У графита число монослоев в слое R(I) равно трем (3) – сравним с рисунком 4. На рисунке 10а показано как изменяется внутреннее давление от количества слоев графена [40]. На рисунке 10б показана интенсивность пика G КРС графена от количества его слоев [41]. Оба рисунка наглядно показывают, что слой R(I) для графита содержит 3 слоя, что говорит о справедливости нашей модели (1). Больше трех слоев графен превращается в графит и значения величин на рис. 10 перестают зависеть от числа слоев.

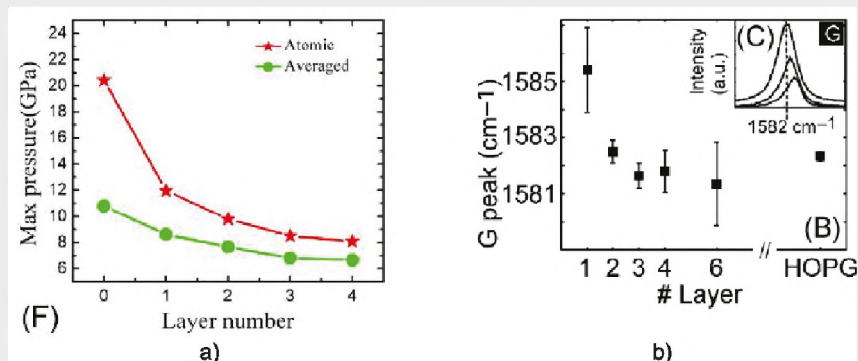


Рисунок 10 - Изменение максимального атомного напряжения (красная линия) и максимального среднего давления (зеленая линия) в зависимости от количества слоев графена (а) [40]; частота линии G в зависимости от количества сложенных слоев (среднее значение и стандартное отклонение). На вставке пик G для HOPG (верхний пик), двухслойного (средний пик) и однослойного (нижний пик) графена. Вертикальная пунктирная линия указывает эталон для объемного графита (б) [41].

В таблице 1 встает вопрос о толщине $R(l)_c$ для однослойного графена? Считается, что высота ступеньки монослоя графена, полученная методом АСМ, равна его толщине. Различные авторы сообщают о толщине монослоя графена в диапазоне $R(l)_c = 0,5-1,7$ нм в зависимости от образцов и условий измерений [42, 43]. В работе [44] толщина монослоя графена составила $R(l)_c = 0,86$ нм. Изменение толщины монослоя графена, о котором сообщают разные авторы, может быть связано с небольшой разницей в адгезии между наконечниками АСМ, графеном и подложкой. В работе [42] было продемонстрировано, что использование расширенных режимов АСМ, таких как режим постукивания PeakForce, позволяет уменьшить погрешность измерения первого слоя от 0,3-1,3 нм до 0,1-0,3 нм. Среднее значение для графена $R(l)_c = 0,15$ нм [42]. Это значение совпадает с нашим значением $R(l)_c = 0,14$ нм (таблица 1), взятое из справочника [45], где дан радиус углерода (0,07 нм). Тогда его диаметр равен 0,14 нм, а графен представляет собой одноатомную аллотропную модификацию углерода. Такое расхождение в определении $R(l)_c$ у разных авторов связано еще с тем, что свободный графен подвержен сморщиванию (смотри ниже).

В слое $R(l)$ происходят реконструкция [32] монослоев (рисунок 11).

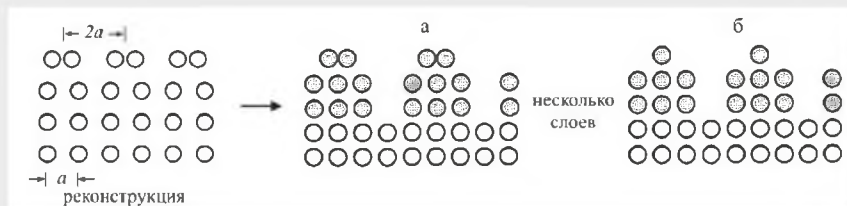


Рисунок 11 - Реконструкция поверхности графита

Размерные эффекты в слое $R(l)$ определяются всем коллективом атомов в системе (коллективные процессы). Такие «квазиклассические» размерные эффекты наблюдаются только в наночастицах и наноструктурах [46]. В работе [47] показано, что при размерах поверхностного слоя менее 6-8 слоев энергия квантовых состояний изменяется ступенчатым способом. Причем каждой ступеньке относят соответствующие квантовые состояния. Таким образом, слой $R(l)$ представляет собой не только наноструктуру, но и квантовую структуру при любой температуре. Свойства слоя $R(l)$ могут существенно отличаться от объема, что уже следует из свойств графена [48].

В таблице 1 встает вопрос о поверхностной энергии γ графита и графена. Термины свободная поверхностная энергия (ПЭ) и удельная поверхностная энергия обычно применяют для характеристики термодинамических свойств границы твердое тело – газ (вакуум). Если рассматривается граница жидкость - газ (пар) или твердое тело - жидкость, то говорят о поверхностном натяжении, размерность которого равна - Н/м. Отметим, что $\text{Дж/м}^2 = \text{Н/м}$

$m^2=H/m$. Экспериментальное определение поверхностной энергии твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления. В настоящее время известно более двадцати методов определения γ . Методам определения ПЭ твердых тел посвящено много монографий, статей и патентов (смотри библиографию в работах [49, 50]). Для графена и графита используют методы ПЭ: метод «лежащей капли» (рисунок 12а) и метод раскалывания (расщепления) кристаллов (рисунок 12б).

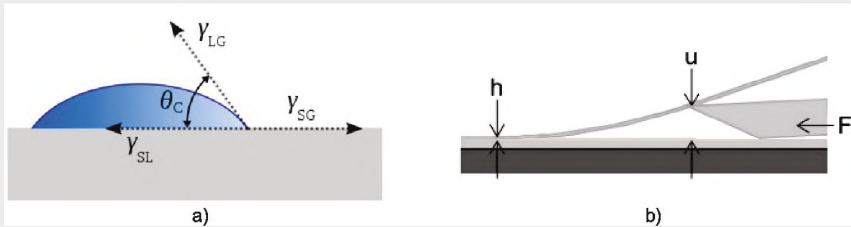


Рисунок 12 - Иллюстрация метода лежащей капли с жидкой каплей частичное смачивание твердой основы (а); расщепление кристаллов с помощью кварцевого клина (б).

В методе лежащей капли используется уравнение Юнга:

$$\cos \theta_C = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG}, \quad (6)$$

где γ_{SG} , γ_{SL} – величины поверхностных энергий на границах твердое тело/пар и твердое тело/жидкость соответственно; γ_{LG} – величина поверхностной энергии на границе жидкость/пар (энергия поверхностного натяжения).

В методе И.В. Обреимова раскалывания (расщепления) кристаллов производится по формуле:

$$\gamma = \frac{E \cdot h^2}{24(1-\mu^2)} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \mu^2}, \quad (7)$$

где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, h – толщина пленки, u – угол между касательной к изогнутому контуру отщепившейся пластинки и направлением движения устья развивающейся трещины.

В работе [51] методом лежащей капли поверхностная энергия графена и оксида графена составляет 46,7 и 62,1 мДж/м² соответственно, в то время как чешуйки природного графита демонстрируют свободную поверхностную энергию 54,8 мДж/м² при комнатной температуре. В работе [52] показано, что

поверхностная свободная энергия взвешенного монослойного графена равна нулю, что свидетельствует о его супергидрофобности. Это следует из уравнения (6), где угол контакта θ любой капли жидкости на подвешенном монослое графена равен 180° . Этот экспериментальный результат был подтвержден теоретически методом молекулярной динамики. В работе [53] отмечено: одним из преимуществ угла смачивания для измерения поверхностной энергии является то, что это широко используемый, относительно простой эксперимент, не требующий дорогостоящего специализированного оборудования. В этой работе было получено, что поверхностная энергия базисной плоскости графита равна 63 ± 7 мДж/м², независимо от размера чешуек графита. Поверхностная энергия базисной плоскости графена составляет 62 ± 4 мДж/м², независимо от размера нанолита. В последней работе [54] показано, что средние поверхностные энергии графена, оксида графена и графита составляют соответственно $44,8 \pm 14,7$, $47,9 \pm 7,2$ и $53,6 \pm 2,1$ мДж/м². Обратимся к предыдущей статье этих авторов и представим их результаты в виде таблицы 2 [55].

Наиболее надежный вариант метода определения γ , основанный на расщеплении кристалла, был предложен в 1930 г. И.В. Обреимовым [56]. Идея этой работы заключается в следующем. От кристалла слюды по плоскости спайности отщепляется пластинка, которая под влиянием момента сил, действующего против поверхностных сил, частично изгибается (рисунок 126). Это пластинка может быть использована в качестве динамометра, измеряющего отщепляющее усилие. Недавно в работе [57] проведено исследование посредством расщепления слюды способом, аналогичным подходу Обреимова, но уже используя современные методы исследования. Энергия адгезии из формулы 4: $W_a = 2\gamma = 0,81 \pm 0,38$ Дж/м², у Обреимова [56] $W_a = 0,76$ Дж/м², в работах [58, 59] $W_a = 0,6 \pm 0,8$ Дж/м², а в нашей теоретической работе $W_a = 0,809$ Дж/м² [60].

Метод Обреимова использовался для графита в работах [60-63], анализ которых был проведен в работе [64]. Поверхностная энергия призматической грани графита оказалась равной $\gamma_a = 1500-5000$ мДж/м², поверхностная энергия базисной грани графита оказалась равной $\gamma_c = 130-150$ мДж/м². Это значительная разница между значениями для графита (смотри, выше). Наши значения γ_a и γ_c , представленные в таблице 1, вычислены по формуле (2) с учетом коэффициента термического расширения графена и графита, пропорционального теплопроводности (рисунок 13а). Коэффициент теплового расширения графена имеет минимум при комнатной температуре и составляет величину $-3,7 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ (рисунок 13б), которое по абсолютной величине в три раза превышает коэффициент теплового расширения графита в плоскости при той же температуре ($1,3 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹) [65]. Из рисунка 13а следует, что графит содержит 3 графеновых монослоя (смотри, таблицу 1, рисунок 10), что подтверждает нашу модель.

Таблица 2 - Статические углы контакта и связанная с ними свободная энергия поверхности

Подложка	Жидкость	$\theta \pm 1$	γ , мДж/м ²
Si	Вода	64	66.75
Si/графен	Вода	92	42.49
Cu-чистый	Вода	68	60.42
Cu-чистый	5.123M NaCl	87	44.76
Cu/графен	Вода	86	45.27
Cu/графен	1.256M NaCl	77	51.06
Cu/графен	2.022M NaCl	71	56.72
Cu/графен	2.468M NaCl	80	48.85
Cu/графен	2.775M NaCl	72	55.65
Cu/графен	3.677M NaCl	75	52.74
Cu/графен	5.173M NaCl	76	51.87

Причина, по которой методы лежащей капли и расщепление кристаллов дают значения с разницей на порядок величин заключается в следующем: во-первых, классическое уравнение Юнга, полученное на основании термодинамического подхода, не работает. Поэтому уравнение краевого угла смачивания требует серьезного пересмотра. И такой пересмотр был сделан в работах [66, 67]. Новое уравнение краевого угла смачивания называют сейчас уравнением Юнга-Верхолова:

$$\cos\theta_C = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG}, \quad (8)$$

где γ_A - сила адгезии на границе твердое тело/пар; γ_{SL} , γ_{LG} - поверхностные натяжения жидкости на границах раздела жидкость/твердое тело и жидкость/пар соответственно.

Во-вторых, метод лежащей капли дает значение поверхностного натяжения жидкости на твердом теле, а не саму поверхностную энергию этого же твердого тела. Это наглядно продемонстрировано в работе [66], где сказано, что поверхностное натяжение воды на поверхности пористого кремния составило 70.6 мДж/м². Это не слишком отличается от таблицы 2, где поверхностная энергия кремния определена как 66.75 мДж/м². Это значит, что все работы [51-55], основанные на методе лежащей капли не могут давать значение поверхностной энергии твердого тела. Это связано с тем, что по Гиббсу необходимо различать поверхностную энергию и поверхностное натяжение твердых тел, они совпадают только для жидкостей [67].

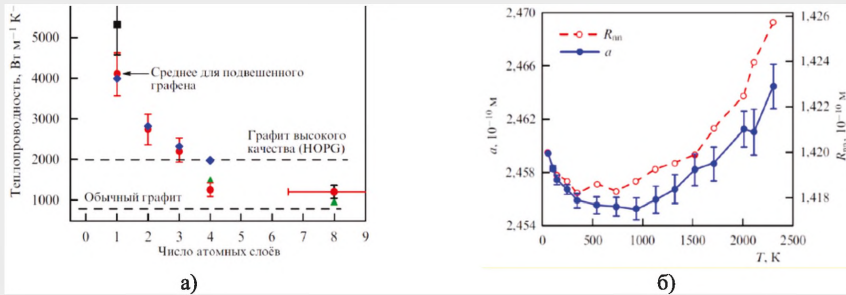


Рисунок 13 - Зависимость коэффициента теплопроводности пленок, составленных из нескольких графеновых слоев, от числа (а); тепловое расширение графена (б) [65].

На сегодня связь между величиной поверхностной энергии γ и поверхностным натяжением σ определяется уравнением Шаттльворта:

$$\gamma = \sigma + \Omega \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_T \quad (8)$$

Здесь Ω - площадь поверхности твердого тела; T - температура. Значит, в табл. 2 нужно заменить величину γ на величину σ . Сказанное подтверждается тем, что в табл. 2 для меди Cu с водой получено $\gamma = 60.42 \text{ мДж/м}^2$. Однако, точное измерение поверхностной энергии меди методом «нулевой ползучести» [68] дано в таблице 3.

Таблица 3 - Поверхностная энергия чистых металлов [68]

Металл	γ , мДж/м ²	Металл	γ , мДж/м ²	Металл	γ , мДж/м ²
Ag	1205	δ -Fe	1910	Si	2130
Au	1410	γ -Fe	2170	Sn	673
Al	1140	Ga	767	Ta	2480
Bi	504	Cd	820	Ti	1938
Cd	675	In	633	Tl	562
Co	2424	Mo	2630	V	1950
Cr	2090	Nb	2210	W	2690
Cu	1520	Ni	1940	Zn	868

Используя уравнения (1)-(5), вычислим параметры для графита и графена (таблица 4). Такие большие внутренние напряжения σ_{is} приводят к существенному короблению однослойного графена, экспериментально обнаруженного в работах [69,70] и теоретически исследованных в работах [71,72]. Такое коробление графена приводит к возрастанию его коэффициента трения [4]. В работе [73] показано, что даже малые деформации графена в пределах 10% достаточны для изменения его поверхности и его адсорбционных свойств.

Таблица 4 - Упругие параметры графита и графена

Углерод	W_{aa} , Дж/м ²	W_{ac} , Дж/м ²	σ_{isa} , ГПа	σ_{isc} , ГПа	E_a , ГПа	E_c , ГПа
Графит	2,853	1,690	4,9	1,36	7,59	3,48
Графен	3,448	-	118,4		1000	-

Если в таблице 4 взять для графена $\sigma_{isa} = 118,4$ ГПа за 100 %, а для графита $\sigma_{isa} = 4,9$ ГПа за x %, то при образовании графена мы получим деформацию графена 4 %, что несколько нижеупомянутых 10 %. В таблице 5 представлены запрещенные зоны, рассчитанные в работе [73] путем варьирования деформаций с шагом 2% в диапазоне от ненапряженного графенового листа до 20 %.

Из таблицы 5 видно, что одноосные деформации способны открывать очень малые запрещенные зоны, а зависимость запрещенной зоны от деформации носит немонотонный характер. Направления «зигзаг» (Z) и «кресло» (A) соответствуют концам графена.

Таблица 5 - Энергетическая щель в зонной структуре графена (Δ , мЭв) при одноосной деформации листа (σ) в направлениях «зигзаг» (Z) и «кресло» (A) [73]

σ , %	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Δ_z	0	10	0	10	70	10	60	60	20	30	30
Δ_A	0	20	30	30	20	10	10	50	90	110	80

О короблении поверхности графена за счет внутренних напряжений можно привести работу [74]. Там показано АСМ-изображение поверхности графена из которого видно, что поверхность состоит из доменов размером 20 x 50 нм, ориентированных в одном направлении и образующих «складки» на поверхности графена высотой 1 нм. При этом значение шероховатости на площади

0.5 x 0.5 мкм составляет около $R_a = 0.25$ нм.

Если рассмотреть рисунок 9б, а также таблицу 4, то можно увидеть, что сам процесс трения можно описывать как процесс упругопластической деформации поверхностного слоя. В работе [75] нами предложена формула:

$$\begin{aligned} A(r)/A(\infty) &= 1 - R(I)/r, \quad r \gg R(I), \\ A(r)/A(\infty) &= 1 - R(I)/R(I) + r, \quad 0 \leq r \leq R(I), \end{aligned} \quad (9)$$

где $A(r)$ – физическое свойство нано- и мезослоя с координатой r ; $A(\infty)$ – физическое свойство объемного образца (объемной фазы) (рисунок 9а).

Если за физическое свойство $A(r)$ принять коэффициент трения k при движении графита (графена) по графиту (графену), то при $1-R(I)/R(I)+r \approx \exp[-(R(I)/R(I)+r)]$ будет в нанослое $k(r) = k(\infty) \exp[-(R(I)/R(I)+r)]$. После этого трение в нанослое, то есть при $r = 0$ и при $r = R(I)$ будет равно:

$k(0) = k(\infty) (1/e) = 0,1/2,72 = 0,04$; $k[R(I)] = k(\infty) (1/e^{1/2}) = 0,1/1,65 = 0,06$. Здесь $k(\infty) = 0,1$ для графита взят из рисунка 8б. В результате в нанослое графита трение будет выглядеть с учетом работы [47] так, как показано на 14а. В мезослое трение будет зависеть по формуле 1 в уравнении (9), при этом $1-R(I) \approx \exp(-R(I)/r)$. Тогда $k[R(I)] = k(\infty) (1/e)$ (рис. 9а) и трение будет выглядеть так, как на рис. 14б.

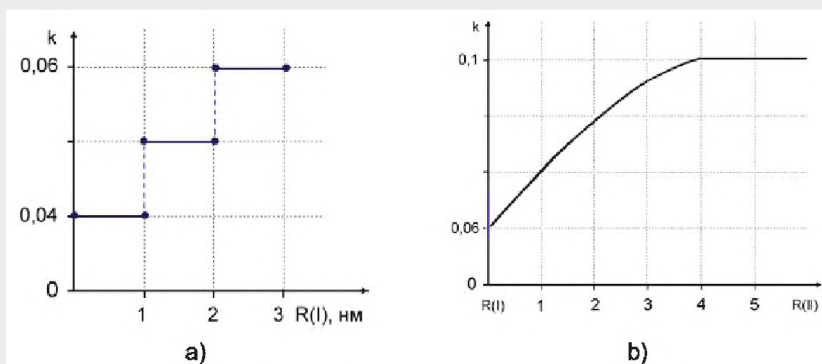


Рисунок 14 - Зависимость коэффициента трения в нанослое (а) и в мезослое (б).

Объясним все сказанное выше теперь конкретно. По мере движение верхнего графита по поверхности нижнего вновь образуется новая поверхность нанометровой толщины. Это означает, что трение совершает колебательное движение (рисунок 15а). Слои $R(I)$, $R(II)$ и объемная фаза имеют разные величины внутреннего трения, которое пропорционально внутренним напряжениям $k \sim \sigma_{is}$ из таблица 4. Когда графит сверху начинает двигаться, то при трении возникает турбулентный фрагмент (рисунок 15б) [76]. Это проявляется в микроструктуре, обнаруженной на поверхности, стали 20 [77] (рисунок 16а) и на нашем сплаве CrNiTiZrCu [78] (рисунок 16б). То же самое происходит и в графите.

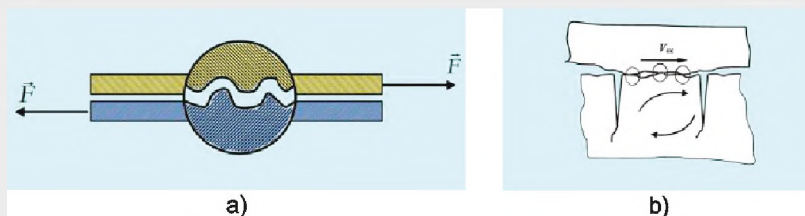


Рисунок 15 - Колебательное движение трения при образовании новой поверхности (а); схема образования турбулентного фрагмента (б).

Подобная структура на рис. 16 характерна для ячеек Бенара [79].

Ячейки Бенара – это возникновение упорядоченности в виде конвективных ячеек в форме цилиндрических валов или правильных шестигранных фигур в слое вязкой жидкости с вертикальным градиентом температуры. А градиент температуры $\text{grad}T \sim k$, т.е. пропорционален коэффициенту внутреннего и внешнего трения, поэтому трение подобно вязкой жидкости (рисунок 17). Подобный эффект замечен сравнительно недавно [80].

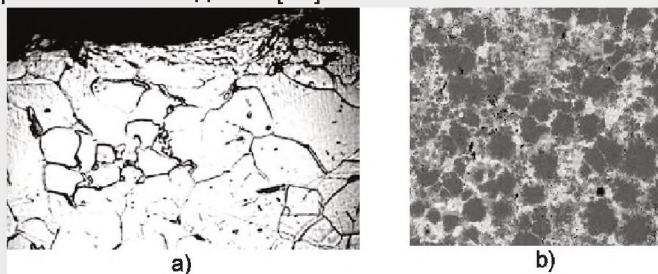


Рисунок 16 - Поверхность трения в момент турбулентного фрагмента образца из стали 20 [77] (а) и сплава CrNiTiZrCu (б) [78].



Рисунок 17 - Ячейки Бенара с силиконовым маслом ПМС-10 с алюминиевой пудрой (а) и (б) с разным увеличением [79].

Более строго (например, [79]) при анализе процессов в системе Бенара в качестве управляющего параметра выбирается число Рэлея: $Re = gL^3\nu a$, где g - ускорение свободного падения, L - характерный размер, b - коэффициент объемного расширения, dT - градиент температуры, ν - кинематическая вязкость, a - коэффициент температуропроводности среды. Поскольку кинематическая вязкость $\nu \sim 1/\gamma$, γ - поверхностная энергия, то из приведенного выше выражения для числа Рэлея следует, что управляющим параметром в нашем случае является $Re \approx C L^3 \gamma$, где $C \sim \text{const}$, а $L = R$ и $2\gamma = W_a$. Иными словами, если произведение $R(l) \cdot W(l)_a$ для движущегося графена по поверхности графита меньше аналогичного произведения, то их разница, включая шероховатость трущихся материалов, равна:

$$[R(l) \cdot W_{aa}]_{\text{графен}} - [R(l) \cdot W_{aa}]_{\text{графит}} + R_a \cdot W_{12} = F = kL, \quad (10)$$

где F – сила трения при движении трущихся материалов; R_a – шероховатость; L – длина пути движения; k – коэффициент трения; W_{12} - энергия адгезии между двумя материалами.

Уравнение (10) может служить критерием выбора антифрикционного покрытия из графена или из его композитов. Для графена в трении по графиту играет нанослой $R(l)$, его трение происходит ступенчатым способом, согласно работе [47] с учетом поверхностных состояний академика Тамма И.Е. [81] (рисунок 14а).

Мерой внутреннего трения кристалла является величина Q^{-1} , которая по Дебаю равна [82]:

$$Q^{-1} = 2Q_{\text{max}}^{-1} \frac{2\pi f\tau}{1 + (2\pi f\tau)^2}, \quad (11)$$

где f – частота колебаний образца, τ – время релаксации, а для графена $Q^{-1} = \sigma_{is} = 0,18 \cdot 10^{-12} = \delta/\pi$ (δ – логарифмический декремент затухания).

Максимальное значение внутреннего трения достигается при $2\pi f\tau = 1$. Время релаксации τ можно определить для слоя $R(l)$, зная скорость звука в графене – $\tau_1 = R(l)/u$. Скорость звука в графене равна $u = 21,3 \cdot 10^3$ м/с [83]. Тогда $\tau_1 = 0,0115 \cdot 10^{-12}$ с и $f_1 = 13,8$ ТГц. Это значит, что для графена наблюдается терагерцевое излучение (рисунок 18) [84].

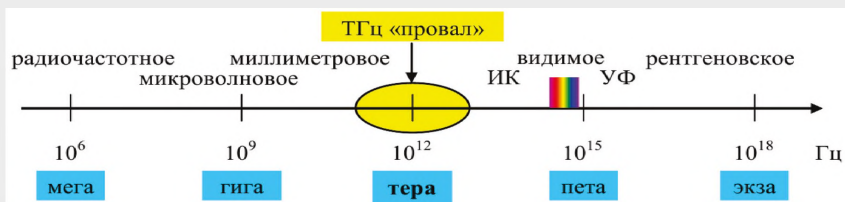


Рисунок 18 - Спектр электромагнитных волн и терагерцовый «провал».

До недавнего времени большая часть терагерцового спектра f не использовалась в связи с тем, что отсутствовали как источники, так и приемники когерентного излучения этого диапазона. Поэтому терагерцовый участок электромагнитного спектра называли «терагерцовым провалом» (рисунок 18). С появлением первого терагерцового квантового каскадного лазера (ККЛ) в 2002 г. [85] и последовавшего значительного прогресса в разработке терагерцового ККЛ «терагерцовый провал» в электромагнитном спектре постепенно начала закрываться. Самым перспективным подходом к созданию эффективных детекторов ТГц излучения является использование наноструктур в качестве чувствительного элемента. К этим наноструктурам относится и графен. В работе [84] продемонстрирован режим детектирования ТГц излучения с использованием полевых транзисторов на основе двухслойного графена.

Вывод. Полученная формула (10) для трения скольжения включает энергию адгезии и значит она относится к молекулярной теории трения из пяти существующих на сегодняшний день. Энергия адгезии определяется поверхностной энергией твердого тела, измерить которую довольно сложно. Предложенная нами модель трения твердого тела, на примере актуальных веществ – графита и графена, включает, кроме энергии адгезии двух трущихся материалов, толщину поверхностного слоя этого материала. Эта толщина определяется нами по формуле (1) и дает значения для твердых тел, включая графит и графен, нанометрового диапазона, отправляя нас в область нанотрибологии. Нанотрибология или молекулярная трибология - направление в трибологии, связанное с теоретическим и экспериментальным изучением процессов адгезии, трения, износа и разрушения в атомных и молекулярных масштабах взаимодействия поверхностей. Ее развитие сдерживалось, на наш взгляд тем, что толщину поверхностного слоя, ответственного за процесс трения можно было определить только в высоком вакууме на атомарно-чистых поверхностях ограниченного числа монокристаллов. Наша модель, изложенная в настоящей статье, открывает новый подход для теоретического и экспериментального исследования процессов в нанотрибологии.

В дальнейшем, мы опишем трение и разрушение ответственных узлов и деталей механизмов и машин, применяемых на промышленных предприятиях и сельском хозяйстве республики Казахстан.

Данная научная статья опубликована в рамках выполнения грантового финансирования на 2024-2026 гг. ИРН № AP32488258 «Разработка инновационной технологии получения графена интеркаляцией графита микрокластерной водой и модификация графеном ВТСП керамики» (исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).

**Мұсахан Н.П.¹, Курбанбеков Ш.Р.¹, Балтабаева Д.Э.¹,
Камбарбеков С.Х.¹**

¹Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Түркістан қ., Қазақстан

65Г БОЛАТЫНА АРНАЛҒАН ZrCN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ МОРФОЛОГИЯЛЫҚ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

Түйіндеме. Бұл мақалада ZrCN негізіндегі жабындарының 65Г болатына арналған физика-механикалық және морфологиялық тұрақтылығын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеу нәтижелері ZrCN негізіндегі керамикалық жабындардың жоғары термиялық тұрақтылыққа және физика-химиялық әсерлерге төзімділікке ие екенін көрсетті, бұл оларды экстремалды жағдайда жұмыс істейтін металл бөлшектер мен кесу құралдарына арналған тиімді қорғаныш жабын ретінде қолдануға мүмкіндік беретіндігімен ерекшеленеді. Зерттеудің мақсаты мақта тазалау машиналарының ара дискілерінде қолданылатын 65Г болаты негізіндегі бөлшектердің тозуға төзімділігін арттыру мақсатында жоғары жылдамдықты оттегі-отын бүрку (ЖЖООБ) технологиясы арқылы алынған ZrCN жабындарының құрылымдық-фазалық және трибологиялық қасиеттерін зерттеу болып табылады. 65Г болатына үш түрлі режимде ZrCN жабындары жағылып, олардың микроқаттылығы мен үйкеліс коэффициенті анықталды. Нәтижесінде, жабын алынған үш үлгінің микроқаттылығының орташа мәні 1661,7 HV құрады және бұл жабындардың түпнұсқа болатқа қарағанда шамамен 3,5 есе жоғары қаттылық көрсетті. Сканерлеуші электронды микроскопиясы (СЭМ) арқылы жабынның морфологиясы, тығыздығы және өтпелі қабаттың құрылымы сипатталып, төмен кеуектілікке қол жеткізілгені расталды. «Шар–диск» схемасы бойынша жүргізілген үйкеліс сынақтары жабынның тозуға төзімділігін және түпнұсқаны тиімді қорғау қабілетін көрсетті. Бұл зерттеу ЖЖООБ әдісімен алынған ZrCN жабындарының ауыл шаруашылығы техникасында қолданылатын бөлшектердің қызмет ету мерзімін арттыруда перспективалы шешім бола алатынын дәлелдейді.

Түйінді сөздер: микроқаттылық, ЖЖООБ, үйкеліс коэффициенті, трибология, ZrCN жабыны, сканерлеуші электронды микроскопия.

Кіріспе. Әртүрлі инженерлік қолданбаларда, тозуға төзімді өрі жоғары беріктікке ие материалдарға деген сұраныс айтарлықтай артуда. Қазіргі таңда, ауыл шаруашылығы өндірісінде жер жырту және кесу құралдарында, сонымен қатар, мақта тазалау машиналары ара дискілерінің мерзімінен бұрын істен шығуы көбіне олардың тозуға төзімділігінің жеткіліксіздігіне байланысты,

бұл олардың жұмыс істеу мерзімі мен тиімділігін төмендетеді. Осыған байланысты, 65Г болаты жоғары беріктігі мен төзімділігіне байланысты мақта мен топырақпен жанасатын бөлшектерді жасау үшін жиі қолданылады [1]. Дегенмен, ауыл шаруашылығы техникасы ауыр жұмыс жағдайында пайдаланылатындықтан және қатты тозуға ұшырайтындықтан, тозған бөлшектерді жыл сайын көп мөлшерде ауыстыруға тура келеді, бұл өз кезегінде өндіріс шығындарының артуына себеп болады [2].

Осыған байланысты көптеген зерттеушілер 65Г болатының үйкеліс пен тозуға төзімділік қасиеттерін арттыру мақсатында, қазіргі уақытта көңінен қолданылатын беттік өңдеу технологияларын доғалық бүрку [3,4], вакуумдық және лазерлік қаптау [5,6], магнетронды тозаңдату [7,8], сондай-ақ дәстүрлі термиялық өңдеу тәрізді әртүрлі технологияларды жан-жақты зерттеген. Бұл беткі өңдеу тәсілдері материалдың қаттылығы мен беріктігін және тозуға төзімділігін белгілі бір деңгейде жақсартқанымен, күтілген нәтижелерге толық жете алмағандығын көрсетеді. Өңдеу әсері тұрақты емес, ал алынған беткі қабаттың құрылымы түпнұсқамен үйлеспейтіндігін алға тартады. Мұндай кемшіліктер 65Г болатының жалпы жұмыс өнімділігіне теріс әсерін тигізіп, оның қызмет ету мерзімін арттыруға мүмкіндік бермейді.

Жоғарыда келтірген жабын алу әдістерінің ішінде ең тиімді әрі болашағы зор деп саналатыны – жоғары жылдамдықты оттегі-отын бүрку технологиясы, бұл тығыздығы жоғары, тозуға төзімді жабындар алу үшін қолданылатын термиялық бүрку процесі. Бұл әдісте жану камерасында отын (пропан) мен оттегінің қоспасы жанып, жоғары температуралы және жоғары қысымды жалын түзіледі. Бұл жалын арнайы саптама арқылы өтіп, аса жоғары жылдамдықтағы газ ағынына айналады. Жабын ұнтағы осы ағынға енгізіліп, қыздырылып, өте жоғары жылдамдықпен бетке бағытталады. Бөлшектер бетке соғылып, жайылып, тез салқындап, берік әрі тығыз қабат түзеді. Нәтижесінде жабын тозуға және коррозияға төзімділігі жоғары, кеуектілігі төмен болып шығады.

ЖЖООБ технологиясы, ол наноқұрылымды жабындар қалыптастыруға жол ашады. Жоғары сапалы жабындарды үнемді және тиімді жолмен алуға мүмкіндік беретін бұл технология бүгінде жабын алумен айналысатын көптеген өнеркәсіп салаларында кең ауқымда пайдаланылады [9-11]. HVOF әдісімен алынған жабындардың физикалық және механикалық қасиеттері көбіне олардың нано-немесе микроқұрылымымен анықталады. Бұл құрылым бөлшектердің түпнұсқаға түсу сәтіндегі физикалық және химиялық параметрлерге – жылдамдық, температура, балқу дәрежесі мен тотықтырғыш құрамына тәуелді түрде қалыптасады [12,13].

Тозуға, қатты механикалық күштерге және химиялық агрессивті ортаға қарсы тұра алатын жабындардың маңыздылығы ерекше. Бұл бағытта ZrCN жабындары мұндай экстремалды жағдайларда өз тиімділігін жоғары деңгейде екендігі көрсетілген [14-17]. Зерттеу нәтижелері бойынша ZrCN негізіндегі керамикалық жабындар жоғары термиялық тұрақтылықпен және физика-

химиялық әсерлерге жоғары төзімділікпен ерекшеленетіні анықталған, бұл оларды аса ауыр жағдайларда жұмыс істейтін металл бөлшектер мен кесу құралдары үшін тиімді қорғаныш жабын ретінде пайдалануға мүмкіндік береді [18]. Сонымен қатар, зерттеу нәтижесінде ZrN/ZrCN жабындарының түйіршіктері Zr/ZrN жабындарымен салыстырғанда ұсақ, тығыз әрі біртекті болып қалыптасатыны белгілі болды. Бұл өз кезегінде ZrN/ZrCN жабындарының қаттылығы, серпімділік модулі және H/E қатынасы жағынан жоғары көрсеткіштерге ие екенін көрсетті [19].

Зерттеудің мақсаты. Мақта тазалау машиналарының ара дискілерінің жұмыс тиімділігін арттыру және тозуға төзімділігін жоғарылату мақсатында 65Г болаты негізіндегі бөлшектерге арналған қорғаныш жабын ретінде ЖЖООБ әдісімен алынған ZrCN жабындарының құрылымдық-фазалық ерекшеліктерін, физика-механикалық қасиеттерін зерттеу және олардың жұмыс ортасына төзімділігін бағалау.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Зерттеу барысында бастапқы үлгі ретінде жоғары көміртекті және қоспаланған болаттар қатарына жататын, 15x20x4мм өлшемге ие 65Г [ГОСТ 14959-79] маркалы болат қолданылды. Оның химиялық құрамы (салмақ үлесі, %) C 0.62-0.70, Si 0.17-0.37, Mn 0.90–1.20, S≤0.035, P≤0.035, Cr≤0.25, Ni≤0.30, Cu≤0.25 және қалғаны Fe [20]. Бүрку процесіне дейін үлгінің беткі қабаты тотығу қабықтарынан тазарту үшін механикалық түрде тегістеліп өңделді, кейіннен жабынның жақсы жабысып бекінуін қамтамасыз ету үшін құммен үрлеу камерасында өңдеу жүргізілді.

Біртекті ZrCN негізіндегі жабындарын алу үшін автоматтандырылған ЖЖООБ технологиясы арқылы Termika-3 қондырғысында жағылды. Бұл қондырғының басқару панелі берілетін газдардың қысымын дәл орнатуға мүмкіндік береді. Қысым көтерілген кезде газдар камера ішінде араласып, мөлшермен берілетін ұнтақ материал жандырғышқа жеткізіледі. Мұнда ұнтақ бөлшектері компрессор арқылы берілетін сығылған ауамен тасымалданады. Жандырғыштың шығу бөлігінде бөлшектер жалын аймағына түсіп, пластикалық деформацияға мүмкіндік беретін температураға дейін қызады. Балқыған бөлшектер алдын ала дайындалған түпнұсқа бетіне бағыттталып, біркелкі қорғаныш жабынды қалыптастырады [21]. Бүрку процесінің негізгі параметрлері 1-кестеде келтірілген.

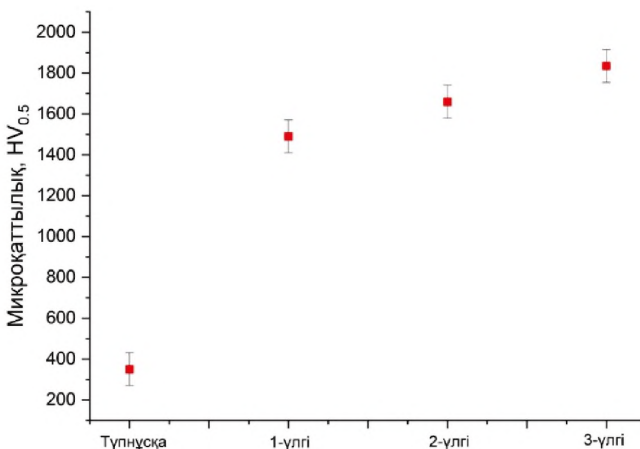
1-кесте - Үлгі бетіне жабын алу параметрлері

№	Арақашықтық	Газ (Пропан, бар)	Ауа қысымы (бар)	Оттегі (бар)	Ұнтақ
1-Үлгі	35-40 см	1,7	2,4	2,8	ZrCN
2-Үлгі	35-40 см	1,7	2,8	2,8	ZrCN
3-Үлгі	35-40 см	1,7	3,8	2,8	ZrCN

Үлгілерге жабынды жағуға дейін және одан кейін қаттылықты анықтау мақсатында ГОСТ 9450-76 стандартына сәйкес Виккерс бойынша қаттылығын өлшеу жүргізілді. Бұл сынақ HLV-1DT микроқаттылықты өлшеу құрылғысымен орындалды. Сынақ кезінде үлгі бетіне уақыт межесі 10 секунд болатын, бұрыштары 136° жасайтын алмаз индентордың көмегімен $HV_{0.5}$ жүктемесі түсірілді. Сынақтың басты мақсаты – HVOF жабынды жағу нәтижесінде үлгі бетінің микроқаттылығын анықтау.

Жабын алынған үлгідердің үйкеліс пен тозуға арналған сынақтары ASTM G99 стандартына сәйкес TRB-3 трибометр құрылғысында «шар–диск» схемасы арқылы жүргізілді. Сынақ жүргізу барысында келесі параметрлер қолданылды: қалыпты күш – 5 Н, сырғу жылдамдығы – 2 см/с, қарсы элемент ретінде диаметрі 6 мм болатын 100Cr6 болат шары пайдаланылды, ал жалпы сырғу жолы – 30 м. Сынақ құрғақ үйкеліс жағдайында өткізілді.

Нәтижелер және талқылау. Жабындар мен үлгілердің микроқаттылығы – олардың механикалық беріктігі мен жұмыс істеу қабілетін анықтайтын негізгі көрсеткіштердің бірі болып табылады. 1-суретте жабын мен үлгі арасындағы Виккерс микроқаттылығының таралуы көрсетілген. Жабынның қаттылығы үлгінікіне қарағанда шамамен 3,5 есе жоғары екендігі байқалды. Бұл көрсеткіштер негізгі материалдың қаттылығы жағынан жабындарға қарағанда әлдеқайда төмен екенін аңғартады және тозуға төзімділікті арттыру үшін қорғаныш жабындарды қолданудың өзектілігін көрсетеді.



1-сурет - 65Г болатының микроқаттылық мәндері. HVOF бүрку режимдері 1-кестеде көрсетілген.

ZrCN жабындарын жағу нәтижесінде микроқаттылықтың айтарлықтай артқаны байқалады, бұл көрсеткіш әр түрлі үлгілерде әрқалай мәнге ие. Ауа қысымы 2.4 бар болатын 1-үлгіде орташа микроқаттылық 1490 HV деңгейіне

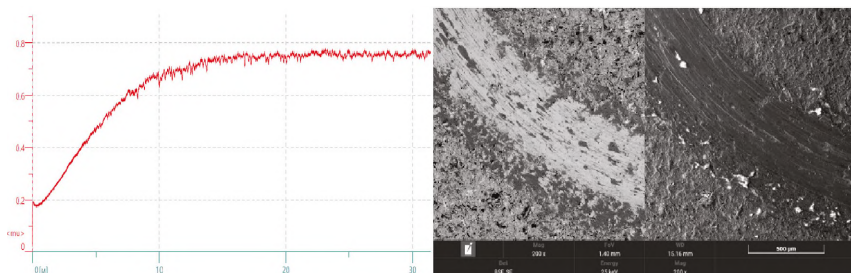
жетіп, бөлшектердің жоғары тығыздалуын және жабынның біртекті құрылымын көрсетеді. Сондай-ақ, ауа қысымы 2.8 болған 2-үлгіде орташа микроқаттылығы 1660 HV екендігі тіркелген, бұл жабынның механикалық беріктігінің жоғары екенін айғақтайды. Ал, ауа қысымы 3.8 бар болған 3-үлгінің орташа мәні ең жоғары – 1835 HV қаттылық мәнін көрсетіп, бұл жабын бөлшектерінің оңтайлы өлшеміне, фазалардың біркелкі таралуына және төмен кеуектілікке байланысты болуы мүмкін. Жабын мен түпнұсқа шекарасында микроқаттылықтың біртіндеп өзгеруі байқалады, бұл бүрку процесі кезінде қорытпа элементтерінің диффузиясы мен температуралық әсерлердің болуы мүмкін екендігін білдіреді.

СЭМ материалдардың микроқұрылымын жоғары дәлдікпен зерттеуге мүмкіндік беретін әдіс болып табылады. Бұл микроскопия түрі арқылы үлгінің морфологиялық ерекшеліктері, атап айтқанда түйіршіктердің пішіні мен өлшемі, кеуектілік, фазалық шекаралар сияқты микроқұрылымдық сипаттамалар анықталады [22]. Әртүрлі режимдерде, мысалы, SE (екіншілік электрондар) және BSE (артқа шашыраған электрондар) арқылы рельеф пен химиялық контраст көрсетіледі. Жалпы алғанда, СЭМ әдісі жабындардың сапасын бағалау және материалтану саласындағы құрылымдық-функционалдық байланыстарды анықтау үшін маңызды құрал болып табылады [23].

ЖЖООБ технологиясы арқылы алынған ZrCN негізіндегі жабындардың 1-үлгі параметріне сәйкес, үйкеліс пен тозуға арналған зерттеу нәтижесі бастапқы кезеңде (0-10 м) үлгі үйкеліс коэффициентінің шамамен 0-ден 0.9036-ке дейін ұлғаюын көрсетеді. Бұл жанасатын материалдар бір-біріне бейімделген кезде, беттердің адаптация процесін көрсетеді. Осы кезеңде шар мен диск арасында тұрақты байланыс орнатылады, беттердегі бұзылулар, микробөлшектер және мүмкін оксидті қабаттар жойылады. Үйкеліс коэффициентінің жоғарылауы тегіс және біркелкі, айтарлықтай ауытқуларсыз, бұл бастапқы кезеңде жабынның немесе материалдың жеткілікті біртектілігін көрсетеді. Бұл сипаттамалар үлгі материалдың ақаусыз немесе қарқынды тозусыз бастапқы жүктемеге төтеп бере алатынын көрсетеді. Бұл фаза контакт аймағындағы қысым барынша шоғырланған кезде материалдың алғашқы үйкеліс циклына қалай әрекет ететінін бағалау үшін маңызды. 15 метрден 20 метрге дейін үйкеліс коэффициенті тұрақтанып, үйкеліс жолы соңына дейін салыстырмалы түрде қалыпты 0,9 үйкеліс коэффициентін көрсетеді. Сонымен қатар, кескінде СЭМ BSE режимінде алынған материалдың көлденең қимасы көрсетілген, онда үш аймақ айқын байқалады: сол жақта – тығыз әрі біртекті түпнұсқа, ортасында – құрылымы кеуекті және әркелкі өтпелі қабат (жабын мен түпнұсқа арасындағы интерфейс), ал оң жақта – тығыздығы төмен, қара түсті қаптама қабаты. Бұл морфология термиялық бүрку арқылы алынған көп-қабатты жабындарға тән құрылымды көрсетеді (2-сурет).

Үйкеліс коэффициенті $\sim 0,2$ -ден $\sim 0,7006$ -ге дейін біркелкі өседі. Бұл ZrCN жабынының үстіңгі қабатының бірте-бірте тозғанын көрсетеді. Бұл кезеңде бет жүктемелерге бейімделеді, сонымен қатар қолдану процесінде сөзсіз пайда болатын жабынның тозу өнімдері (ұсақ бөлшектер) жойылуы мүмкін жанасу аймағында қалыптасады, бұл үйкелістің тегіс артуына да әсер етеді. Беткейлердің «ұнтақталуы» (притирка) деп аталатын нәрсе орын алады - жабынның қарсы корпустың пішініне бейімделуі. ZrCN жабыны түпнұсқаны қарсы корпустен тікелей жанасудан тиімді қорғайды, болат тозуының қарқындылығын төмендетеді. Бұл кезеңде жабын белсенді абразивті режимде жұмыс істейді, оның негізгі міндеті - түпнұсқаны қорғау. Қаптаманың тозуы аяқталғаннан кейін үйкеліс коэффициенті $\sim 0,75$ деңгейінде тұрақтанады. Тербеліс минималды, бұл жүйенің біркелкі жұмысын көрсетеді. Фазаның ортасында жабын толығымен тозып, түпнұсқа, 65Г болат байланысқа түсті. Бұл кезеңде жұмыс негізінен түпнұсқаның механикалық сипаттамаларына байланысты орын алады. ZrCN қорғаныш қасиеттерінің арқасында жабыннан түпнұсқаға өту тегіс, бұл үйкелісте кенеттен секірулерді болдырмайды. Соңғы фазада (20–30 м) үйкеліс коэффициенті минималды ауытқулармен $\sim 0,7777$ – $0,8328$ тұрақты болып қалады. Бұл түпнұсқаның тұтастығының сақталғанын көрсетеді. Бұл кезеңде түпнұсқа жұмысты толығымен қабылдайды. Бақыланатын шамалы ауытқулар болат тозу өнімдерінің пайда болуымен немесе бетінің микроқұрылымындағы шамалы өзгерістермен байланысты болуы мүмкін, үйкеліс коэффициентінің күрт жоғарылауы негіздің тозуға төзімділігі мен механикалық тұрақтылығын көрсетеді. Қаптау, бұл фазада болмаса да, өзінің негізгі міндетін орындады - түпнұсқаның бастапқы тозуын азайту, бұл оның тұрақты мінез-құлқын көрсетуге мүмкіндік береді. Жабын мен түпнұсқа жүйесі ұзақ мерзімді тұрақтылықты көрсетеді, бұл ZrCN 65Г болат негізімен біріктірудің тиімділігін растайды. 3-үлгінің СЭМ арқылы алынған кескінде жабынның екі аймағы көрсетілген: сол жақтағы құрылым кеуекті, фазалық әркелкілігі жоғары және дәндер арасы айқын байқалады, бұл өтпелі қабатқа тән, ал оң жақтағы аймақ біртекті, бетінде механикалық өңдеу іздері мен ақшыл қатты бөлшектер бар, бұл жабынның беткі қабатының тығыз өрі тұрақты екенін көрсетеді.

Зерттеу нәтижелерін талдай келе, салыстырмалы түрде үш үлгінің де ZrCN жабындары үйкеліс процесінің бастапқы кезеңінде тиімді қорғаныш қабат ретінде қызмет атқарғаны байқалады. 2-суретте бейнеленген 1-үлгіде үйкеліс коэффициентінің ең жоғары мәні ($\sim 0,9$) тіркеліп, жабынның жоғары адгезиялық қасиеттерін және тығыз морфологиясын көрсетті. 3-суретте көрініс тапқан 2-үлгіде үйкеліс коэффициенті бірқалыпты және біртіндеп өсуімен ерекшеленіп, жабын мен субстрат арасындағы жақсы үйлесімділікті және тиімді адаптация процесін дәлелдейді. Ал 4-суреттегі 3-үлгіде жабын тозғаннан кейін де жүйе біркелкі жұмыс істеп, үйкеліс коэффициентінің салыстырмалы тұрақтылығын сақтады, бұл түпнұсқа 65Г болаттың жоғары механикалық төзімділігін көрсетеді. Жалпы, барлық үлгілерде ZrCN жабындарының тозуға қарсы тиімділігі мен түпнұсқаны бастапқы жүктемеден қорғау қабілеті жоғары деңгейде екені анықталды.



4-сурет - Бұрку параметрі: газ – 1,7 бар, ауа қысымы – 3,8 бар, оттегі – 2,8 бар-ға ие 1-үлгінің үйкеліс коэффициенті және үйкеліс жолының СЭМ кескіні

Қорытынды. Қорытындылай келе, жүргізілген зерттеу нәтижелері ZrCN негізіндегі жабындардың 65Г болаты үшін тиімді қорғаныш қабат бола алатынын көрсетті. Виккерс әдісі бойынша микроқаттылық таралуына сүйене отырып, жабындардың қаттылығы бастапқы болатқа қарағанда шамамен 3,5 есе жоғары екендігі анықталды, бұл олардың жоғары механикалық беріктігі мен тозуға төзімділігін дәлелдейді. СЭМ әдісі арқылы алынған үйкеліс коэффициенті мен үйкеліс жолының кескініне сәйкес, жабын мен түпнұсқа арасындағы интерфейстің құрылымдық ерекшеліктерін ашып көрсетіп, жабынның тығыздығы, біртектілігі - үлгілердің жақсы сапада орындалғанын растады. Үйкеліс коэффициентінің өзгеру динамикасы әр үлгіде жабын мен түпнұсқа арасындағы өзара әрекеттесу ерекшеліктерін көрсетті. Бұрку параметрі газ – 1,7 бар, ауа қысымы – 2,4бар, оттегі – 2,8 бар-ға ие 1-үлгі - үйкеліс коэффициентінің жоғары мәндерін көрсете отырып, жабынның трибологиялық жүктемелерге төзімділігін растады. Сондай-ақ, бұрку параметрі: газ – 1,7 бар, ауа қысымы – 2,8 бар, оттегі – 2,8 бар-ға ие 2-үлгіде тиімді үйкеліс тұрақтылығымен және салыстырмалы төмен кедергімен ерекшеленіп, практикалық қолдану үшін оңтайлы нұсқа болып табылады. Ал, бұрку параметрі: газ – 1,7 бар, ауа қысымы – 3,8 бар, оттегі – 2,8 бар болған 3-үлгі үшін үйкеліс коэффициентінің ең төменгі мәндеріне ие болғанымен, бұл оның тозуға төзімділігі төмендеу болуы мүмкін екенін көрсетеді. Жалпы алғанда, ЖЖООБ технологиясымен алынған ZrCN жабындары 65Г болаттың қызмет ету мерзімін ұзартуға, тозуға төзімділігін арттыруға және трибологиялық сипаттамаларын жақсартуға елеулі үлес қоса алатынын көрсетті. Бұл нәтижелер болашақта жабындарды өндіру мен қолдану параметрлерін оңтайландыруда пайдалы болмақ.

Зерттеулерді қаржыландыру көзі - зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігінің Ғылым Комитетінің қолдауымен «AP22787358 - Мақта тазалау машиналарының ара дискілері үшін наноқұрылымдық қорғаныш жабынды алу-дың тиімді технологияларын әзірлеу» жобасы аясында жүргізілді.

Әдебиеттер/References

- 1 Wang X., & Li J. (2023). Experimental investigation of 65Mn processed by equal channel angular pressing. Results in Engineering, 18. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101222>
- 2 Wang Y., Li D., Nie C., Gong P., Yang J., Hu Z. & Ma M. (2023). Research progress on the wear resistance of key components in agricultural machinery. *Materials*, 16(24), 7646.
- 3 Ndumia J. N., Kang M., Gbenontin B. V., Lin J., Liu J., Li H. & Nyambura S. M. (2023). Optimizing Parameters of Arc-Sprayed Fe-Based Coatings Using the Response Surface Methodology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(7), 2202–2220. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01621-2>
- 4 Ndumia J. N., Kang M., Gbenontin B. V., Lin J., Liu J. & Nyambura S. M. (2023). Evaluation of thermal shock failure mechanism of arc-sprayed Fe-based coatings deposited on different substrates. *Surface and Coatings Technology*, 474, 130081.
- 5 Huang K., Wu K., Li S., Zhang Z., Li M., Wang L., Yi X. (2023). Microstructure and properties evaluation of vacuum and laser cladding Ni-base composite coatings. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 129(2). <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06411-9>
- 6 Fang Y. & Chen X. (2023). Effect of Nano-La₂O₃ and Mo on Wear Resistance of Ni60a/SiC Coatings by Laser Cladding. *Processes*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/pr11030850>
- 7 Padamata S. K., Yasinskiy A., Yanov V. & Saevarsdottir G. (2022, February 1). Magnetron Sputtering High-Entropy Alloy Coatings: A Mini-Review. *Metals*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/met12020319>
- 8 Musil J. & Vlček J. (2001). Magnetron sputtering of hard nanocomposite coatings and their properties. *Surface and Coatings Technology*, 142–144, 557–566. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01139-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01139-2)
- 9 Рахадиллов Б.К., Муктанова Н., Журерова Л.Г. Применение технологии hvof для получения износостойких покрытий на основе wc – обзор. Вестник НЯЦ РК. 2023;(1):4–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14>. [Rakhadilov B.K., Muktanova N., Zhurerova L.G. Primenenie tekhnologii hvof dlya polucheniya iznosostoykikh pokrytiy na osnove wc – obzor. Vestnik NYaTs RK. 2023;(1):4–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14>]
- 10 Nie H., Li Z., Zhou H., Wu J., Wen G. & Li Y. (2024). Study on the wear resistance and mechanism of HVOF-sprayed WC10Co4Cr coatings. *Surface and Coatings Technology*, 494, 131368.
- 11 Guzanová A., Brezinová J., Draganovská D. & Maruschak P. O. (2019). Properties of coatings created by HVOF technology using micro- and nano-sized powder. *Koroze a Ochrana Materialu*, 63(2), 86–93. <https://doi.org/10.2478/kom-2019-0011>
- 12 Berger L. M. (2015). Application of hardmetals as thermal spray coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 49(1), 350–364. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029>
- 13 He J. & Schoenung J. M. (2002, October 25). Nanostructured coatings. *Materials Science and Engineering: A*. Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01986-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01986-4)
- 14 Silva E., de Figueiredo M. R., Franz R., Galindo R. E., Palacio C., Espinosa A., & Carvalho, S. (2010). Structure–property relations in ZrCN coatings for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 2134–2141.
- 15 Braic M., Braic V., Balaceanu M., Zoita C. N., Kiss A., Vladescu, A. & Ripeanu, R. (2011). Structure and properties of Zr/ZrCN coatings deposited by cathodic arc method. *Materials Chemistry and Physics*, 126(3), 818–825.
- 16 Kudapa S., Narasimhan K., Boppana P. & Russell W. C. (1999). Characterization and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN coatings. *Surface and Coatings Technology*,

120, 259-264.

17 Frank F., Tkadletz M., Czettl C., & Schalk N. (2021). Microstructure and Mechanical Properties of ZrN, ZrCN and ZrC Coatings Grown by Chemical Vapor Deposition. *Coatings*, 11(5), 491. <https://doi.org/10.3390/coatings11050491>

18 Акула И. П., Чекан Н. М., Хома М. Ю., & Онысько С. Р. (2024). Композиционное покрытие AlCr (C) N/Zr (C) N. Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров, 2(Часть 1), 6-16. [Akula, I. P., Chekan, N. M., Khoma, M. Yu., & Onysko, S. R. (2024). Kompozitsionnoe pokrytie AlCr(C)N/Zr(C)N. Perspektivnye napravleniya innovatsionnogo razvitiya i podgotovki kadrov, 2(Chast' 1), 6–16.]

19 Ul-Hamid A. Deposition, microstructure and nanoindentation of multilayer Zr nitride and carbonitride nanostructured coatings. *Sci Rep* 12, 5591 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09449-6>

20 Lu Y., Peng Y. & Shi, Z. (2024). Plasma nitrided 65Mn steel: microstructure, tribocorrosion and electrochemical properties and DFT calculation. *Wear*, 544, 205319.

21 Kurbanbekov S., Rakhadilov B., Kakimzhanov D., Seitov B., Katpaeva K., Kurmantayev A. & Kengesbekov A. (2024). Research on the Structural–Phase and Physical–Mechanical Characteristics of the Cr3C2–NiCr Composite Coating Deposited by the HVOF Method on E110 Zirconium Alloy. *Coatings*, 14(8), 1030.

22 Goldstein J. I. et al. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. – springer, 2017.

23 Echlin P., Fiori C. E., Goldstein J., Joy D. C. & Newbury D. E. (2013). *Advanced scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer Science & Business Media.

Coating Deposited by the HVOF Method on E110 Zirconium Alloy. *Coatings*, 14(8), 1030.

Мусахан Н.П.¹, Курбанбеков Ш.Р.¹, Балтабаева Д.Э.¹, Камбарбеков С.Х.¹

¹Международный казахско-турецкий университет имени Х.А. Ясави, г.Туркестан, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ И МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПОКРЫТИЙ ZRCN ДЛЯ СТАЛИ 65Г

Аннотация. В данной статье представлены результаты исследования физико-механической и морфологической устойчивости покрытий на основе ZrCN, нанесённых на сталь 65Г. Результаты исследования показывают, что керамические покрытия на основе ZrCN обладают высокой термической стабильностью и устойчивостью к физико-химическим воздействиям, что делает их эффективным защитным покрытием для металлических деталей и режущих инструментов, работающих в экстремальных условиях. Целью исследования является изучение структурно-фазовых и трибологических свойств покрытий ZrCN, полученных методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (ВСКТН), с целью повышения износостойкости деталей из стали 65Г, применяемых в пыльных дисках хлопкоочистительных машин. На сталь 65Г были нанесены покрытия ZrCN в трёх различных режимах, после чего были определены их микротвёрдость и коэффициент трения. В результате среднее значение микротвёрдости трёх образцов с нанесённым покрытием составило 1661,7 HV, что примерно в 3,5 раза выше по сравнению с исходной сталью. С помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) была охарактеризована морфология, плотность покрытия и структура переходного слоя, при этом подтверждена низкая пористость. Испытания на износ по схеме «шар–диск» показали высокую износо-

стойкость покрытия и его способность эффективно защищать основной материал. Данное исследование доказывает, что покрытия ZrCN, полученные методом HVOF, представляют собой перспективное решение для увеличения срока службы деталей, используемых в сельскохозяйственной технике.

Ключевые слова: микротвёрдость, ВСКТН, коэффициент трения, трибология, покрытие ZrCN, сканирующая электронная микроскопия.

* * *

Mussakhan N.P.¹, Kurbanbekov Sh.R.¹, Baltabayeva D.E.¹, Kambarbekov S.Kh.¹

¹Akhmet Yassawi University, Turkistan c., Kazakhstan

INVESTIGATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL AND MORPHOLOGICAL STABILITY OF ZrCN COATINGS FOR 65G STEEL

Abstract. This article presents the results of a study on the physicomachanical and morphological stability of ZrCN-based coatings applied to 65G steel. The findings demonstrated that ceramic coatings based on ZrCN possess high thermal stability and resistance to physicochemical effects, making them an effective protective coating for metal parts and cutting tools operating under extreme conditions. The aim of the study was to investigate the structural-phase and tribological properties of ZrCN coatings obtained by High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) spraying in order to improve the wear resistance of 65G steel components used in the saw blades of cotton ginning machines. ZrCN coatings were applied to 65G steel in three different spraying modes, and their microhardness and coefficient of friction were determined. As a result, the average microhardness of the three coated samples was 1661.7 HV, which is approximately 3.5 times higher than that of the base steel. Scanning Electron Microscopy (SEM) was used to characterize the morphology, density, and structure of the transition layer of the coating, confirming low porosity. Friction tests conducted using the “ball–disk” scheme showed the high wear resistance of the coating and its ability to effectively protect the substrate. This study demonstrates that ZrCN coatings obtained by the HVOF method represent a promising solution for extending the service life of components used in agricultural machinery.

Keywords: microhardness, HVOF, coefficient of friction, tribology, ZrCN coating, scanning electron microscopy.

Авторлар туралы мәліметтер

Мұсахан Нүркен Парсаханұлы – магистр, Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және жаңа материалдар ғылыми-зерттеу институтының ғылыми қызметкері, Түркістан қ., Қазақстан, nurken.mussakhan@ayu.edu.kz

Курбанбеков Шерзод Рустамбекович – PhD, қауымдастырылған профессор, Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және жаңа материалдар ғылыми-зерттеу институтының директоры, Түркістан қ., Қазақстан, sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

Балтабаева Дилноза Эрмахаммадқызы – магистр, Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және

жаңа материалдар ғылыми-зерттеу институтының ғылыми қызметкері, Түркістан қ., Қазақстан, dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

Камбарбеков Сардор Хуснутдинұлы – магистр, Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Жаратылыстану ғылымдары, нанотехнологиялар және жаңа материалдар ғылыми-зерттеу институтының кіші ғылыми қызметкері, Түркістан қ., Қазақстан, sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz

Сведения об авторах

Мусахан Нуркен Парсаханұлы – магистр, научный сотрудник научно-исследовательского института «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы», Международный казахско-турецкий университет имени Х.А.Ясави, г.Туркестан, Казахстан, nurken.mussakhan@ayu.edu.kz

Курбанбеков Шерзод Рустамбекович – PhD, ассоциированный профессор, директор научно-исследовательского института «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы», Международный казахско-турецкий университет имени Х.А.Ясави, г. Туркестан, Казахстан, sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

Балтабаева Дилноза Эрмахаммадқызы – магистр, научный сотрудник научно-исследовательского института «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы», Международный казахско-турецкий университет имени Х.А.Ясави, г. Туркестан, Казахстан, dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

Камбарбеков Сардор Хуснутдинұлы – магистр, младший научный сотрудник научно-исследовательского института «Естественные науки, нанотехнологии и новые материалы», Международный казахско-турецкий университет имени Х.А.Ясави, г. Туркестан, Казахстан, sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz

Information about the authors

Mussakhan Nurken Parssakhanuly – master, researcher at the Scientific Research Institute «Natural Sciences, nanotechnologies and new materials», Akhmet Yassawi University, Turkestan c., Kazakhstan, nurken.mussakhan@ayu.edu.kz

Kurbanbekov Sherzod Rustambekovich – PhD, Associate Professor, Head of the Scientific Research Institute «Natural Sciences, nanotechnologies and new materials», Akhmet Yassawi University, Turkestan c., Kazakhstan, sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz

Baltabayeva Dilnoza Ermakhammadkyzy – master, researcher at the Scientific Research Institute «Natural Sciences, nanotechnologies and new materials», Akhmet Yassawi University, Turkestan c., Kazakhstan, dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz

Kambarbekov Sardor Khusnutdinuly – master, Junior Researcher at the Scientific Research Institute «Natural Sciences, nanotechnologies and new materials», Akhmet Yassawi University, Turkestan c., Kazakhstan, sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz

Altay Y.A.¹, Ablesh G.¹, Fedorov A.V.²

¹Satbayev University, Almaty c., Kazakhstan

²ITMO University, Saint-Petersburg c., Russia

SINGLE-FREQUENCY FILTER FOR SIGNAL PROCESSING

Abstract. Modern methods of band-stop filtering are sensitive to the influence of high-frequency single-frequency interference, which significantly distorts the shape of the informative signal. The noted feature is leveled by the system of narrow-band high-Q band-stop filtering developed in the article. The narrow-band high-Q band-stop filter is approximated by the Butterworth polynomial of the second degree and has the property of a closed circuit of the negative feedback loop, which, unlike the existing system, ensures high-precision processing of noisy measurements. The choice of this second-degree polynomial is justified by its maximally flat and symmetrical amplitude-frequency characteristic, the absence of pulsations in the interference suppression band and signal transmission, as well as the allocation of the lowest distortion for the selected order. The article under consideration presents the result of synthesis of a control system for a narrow-band high-Q band-stop filter with a variation of the correction coefficient of the feedback loop, which increases the efficiency of processing noisy measurements when introducing a value for this coefficient $K = 0.1$. It was revealed that the smallest value of this coefficient, compared to the value obtained when forming single feedback, significantly increases the value of the filter gain on its frequency response and thereby ensures narrowing of the suppression band to increase the quality factor of the rejection filter at the interference frequency. Moreover, a non-random and significant correlation relationship was found between the measured indicators, caused by a decrease in the accuracy and noise immunity indicators of the signal processing system with an increase in the values of the correction coefficient of the feedback loop of the rejection filter of the selected order. At the same time, understanding the discovered relationship used in developing a method for processing noisy measurements will significantly improve the accuracy and noise immunity of the signal processing system. The presented results, characterizing a statistically significant and non-random relationship, confirm the operability and functioning of the signal processing system, which determines the operation of a high-quality rejection filter when filtering single-frequency interference.

Keywords. Filter, signal processing, feedback control, accuracy, noise resistance.

Introduction. Today, the development of new and robust methods for rejection filtering against high-frequency interference is a pressing issue in the processing of measurement information. This relevance stems from the fact that such filters largely allow their parameters [1-4] to be adjusted to those of the processed signals when isolating the informative components of the signal from an additive mixture of high-frequency and single-frequency narrowband interference. Inter-

ference with such frequency content is primarily induced by the electrical network [5,6] when connecting external high-frequency devices [4] and various motors [7,8]. The presence of interference in signal information can significantly affect the measurement accuracy of the signal component, which can only be improved through the use of filtering methods [2,4,9].

Among the filtering methods, not only notch filters but also low-pass filters [10] are capable of filtering this interference. Unlike notch filters, low-pass filters, due to the characteristics they impart when filtering interference, are capable of smoothing the amplitude of the information signal, which is mainly due to the type of placement of the root loci-zeros and poles and their distance from each other on the complex plane. Consequently, a notch filter on the complex plane localizes the root loci-poles and zeros-rather close to each other due to the presence of the parameter $s^2 + \omega^2$ in the numerator of the continuous transfer function of this filtering element [3].

The frequency response of a band-stop filter is approximated in the vast majority of cases using polynomial models [2-4], which allow one to achieve the required form of the amplitude-frequency response for solving the signal processing problem. Among the well-known and widely used polynomial models for approximating the frequency response are those based on the Butterworth, Bessel, Chebyshev, Newton, and Cauer polynomials [2-4,9]. The listed polynomial models allow one to obtain a clearly distinguishable frequency response of the filter [10], which affects the efficiency of signal processing when filtering out the interference signal. Due to the use of the listed polynomial models for approximating the frequency response, the class of these methods is usually called the Butterworth, Bessel, Newton, Chebyshev, and Cauer polynomial filters [10].

According to the research data on notch filters [2, 11-14], among the listed methods of notch filtering, the filter approximated by the Butterworth polynomial provides high accuracy of signal processing. This is mainly due to the low values of signal processing accuracy and the generation of the largest values of the intrinsic error of these filters associated with their frequency characteristics, the noise stop band and the quality factor Q of the notch filter. In addition, the quality factor also has a significant impact on the accuracy of processing during signal measurement and the value of this indicator can be low only in the case [2] when the noise stop band is expanded. In the works [10], it was identified and established that two approaches are mainly used for the synthesis of notch filters using polynomial models.

The first approach is based on the use of a stop-band of interference B , while the value of the quality factor Q of the filter under consideration is inversely proportional to this indicator. Consequently, the efficiency of signal processing at the output of such a system under the influence of single-frequency narrow-band interference will be insufficiently high [2]. In addition, this approach to the synthesis of a rejection filter is accompanied by a doubling of the filter order, which may be a characteristic process in the production of band-pass filters and band-stop polynomial continuous filters [10]. It is important to emphasize that in this approach,

when using an approximating first-degree polynomial $n=1$ for synthesis, the order of the filtering system is equal to two, that is, $n=2$, which leads to a change in the characteristics of the filters and is considered a feature of this approach.

The second approach is based on a parallel connection of the transfer functions of high-pass and low-pass filters (HPF and LPF), where the lower filter notch boundary is characterized by the cutoff frequency ω_1 for the HPF and the upper cutoff frequency ω_2 for the LPF. The overall transfer function $W(s)$ of such a notch filter is calculated by adding the two transfer functions of the HPF and LPF. This approach differs from the first in that, instead of the interference stop-band B, the cutoff frequencies ω_1 and ω_2 are used, defining the rejection width of a single-frequency interference variable over a specific frequency range.

In [2], building on approach 2, a new single-frequency notch filter is synthesized. This filter is based on a second-degree Butterworth polynomial and is characterized by high filtering efficiency for noisy signals and accuracy compared to the Daubechies filter [11,15]. The key characteristic of the synthesized new notch filter is its high frequency quality factor, as well as its uniform frequency response, which has a positive effect on the efficiency of signal processing.

However, despite the noted superiority of the synthesized notch filter [2] over the Daubechies filter [11,15], the question of its further development by forming a feedback loop to correct its frequency response is currently considered open. Solving this processing problem is necessary to increase the gain on the filtering system's frequency response, which is inevitably reduced by forming a single-feedback loop. Therefore, synthesizing the overall transfer function of a notch filter with negative feedback to evaluate the effect of the correction coefficient on the frequency response for this element is a relevant and fundamental problem requiring a comprehensive approach.

In contrast to [2-4], this article presents the results of an assessment of signal processing accuracy by analyzing the effect of the feedback loop's correction coefficient on the frequency response of a single-frequency notch filter.

Materials and research methods. The synthesis method is based on the mathematical apparatus of transfer functions of continuous analog filters in a normalized frequency range, allowing the synthesis of high- and low-pass filters, where the resulting general transfer function for a single-frequency rejection filter is obtained by adding two filter circuits of the signal processing system, which has the form:

$$\left\{ \begin{aligned} W_{1_ФНЧ}(s) &= W_{\text{нормированный}}(s) \Big|_{s \rightarrow \frac{s}{\omega_c}} = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2 + 1,414 \frac{s}{\omega_c} + 1} = \\ \frac{1}{\frac{s^2 + 1,414 \omega_c s + \omega_c^2}{\omega_c^2}} &= \frac{\omega_c^2}{s^2 + 1,414 \omega_c s + \omega_c^2} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\begin{cases} W_{2_ФВЧ}(s) = W_{\text{нормированный}}(s) \Big|_{s \rightarrow \frac{\omega_c}{s}} = \frac{1}{\left(\frac{\omega_c}{s}\right)^2 + 1,414 \frac{\omega_c}{s} + 1} \\ = \frac{1}{\frac{s^2 + 1,414 \omega_c s + \omega_c^2}{s^2}} = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \omega_c s + \omega_c^2}. \end{cases} \quad (2)$$

The general transfer function $W(s)$ of a single-frequency notch filter is:

$$\begin{aligned} W(s) &= W_1(s) + W_2(s) = \\ &= \frac{s_c^2}{s^2 + 1,414 \omega_c s + \omega_c^2} + \frac{\omega_c^2}{s^2 + 1,414 \omega_c s + \omega_c^2} = \frac{s_c^2 + \omega_c^2}{s^2 + 1,414 \omega_c s + \omega_c^2} \end{aligned} \quad (3)$$

The control system for the synthesized general transfer function of the notch filter is implemented by adding negative feedback with a correction coefficient K , variable in the range $0.1 < K < 1.0$, respectively. The transfer functions of a single-frequency notch filter with a second-degree Butterworth polynomial with coefficient K are as follows:

$$\begin{cases} W_{\text{общ}_K=0,1}(s) = \frac{10s^2 + 10\omega_c^2}{11s^2 + 1,414\omega_c s + 11\omega_c^2} \\ W_{\text{общ}_K=0,2}(s) = \frac{5s^2 + 5\omega_c^2}{6s^2 + 1,414\omega_c s + 6\omega_c^2} \\ W_{\text{общ}_K=0,3}(s) = \frac{10s^2 + 10\omega_c^2}{13s^2 + 4,242\omega_c s + 13\omega_c^2} \\ W_{\text{общ}_K=0,4}(s) = \frac{5s^2 + 5\omega_c^2}{7s^2 + 2,828\omega_c s + 7\omega_c^2} \\ W_{\text{общ}_K=0,5}(s) = \frac{2s^2 + 2\omega_c^2}{3s^2 + 1,414\omega_c s + 3\omega_c^2} \\ W_{\text{общ}_K=0,6}(s) = \frac{5s^2 + 5\omega_c^2}{8s^2 + 4,242\omega_c s + 8\omega_c^2} \\ W_{\text{общ}_K=0,7}(s) = \frac{10s^2 + 10\omega_c^2}{17s^2 + 9,898\omega_c s + 17\omega_c^2} \\ W_{\text{общ}_K=0,8}(s) = \frac{5s^2 + 5\omega_c^2}{9s^2 + 5,656\omega_c s + 9\omega_c^2} \\ W_{\text{общ}_K=0,9}(s) = \frac{10s^2 + 10\omega_c^2}{19s^2 + 12,726\omega_c s + 19\omega_c^2} \\ W_{\text{общ}_K=1}(s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{2s^2 + 1,414\omega_c s + 2\omega_c^2} \end{cases} \quad (4)$$

The properties of a synthesized second-order notch filter control system are assessed in two stages: direct and indirect parameters at a normalized cutoff frequency of $\omega = 1$ rad/s [10]. The indirect parameters are the amplitude-frequency response (AFR) and root-square characteristic, while the direct parameters are the filter's transient response. These parameters are considered informative for identifying the internal processes occurring within the filtering system's structure.

A relationship illustrating the influence of the feedback loop correction coefficient is demonstrated using a linear regression analysis method, which allows one to determine the strength of the relationship between the evaluated parameters [16], calculated at the output of the synthesized notch filtering system. The parameters used in the evaluation were those that most fully characterize the filtering system's performance when solving a signal processing problem.

The closeness, strength, and direction of the estimated relationship between the correction coefficient and the indicators are determined using the Chaddock scale and characterized as follows: $0.9 < r < 1.0$ – very high (strong) relationship, $0.7 < r < 0.9$ – high relationship, $0.7 > r > 0.5$ – noticeable relationship, $0.5 < r < 0.3$ – moderate relationship, $0.3 < r < 0.1$ – weak relationship. The non-randomness of the resulting relationship between the indicators is characterized by the p-level of significance, where the threshold level for accepting the hypothesis of a significant relationship is $p = 0.05$, respectively.

Research results. The results obtained after substituting (1) and (2) the value $\omega = 1$ rad/second into the overall $W(s)$ transfer function (3) of the notch filter with feedback (4) for $0.1 < K < 1.0$, made it possible to study the endowed properties illustrated in Figure 1. In this case, Figure 1 shows, for clarity, the filter characteristics calculated for the values of the contour coefficient $K=0.1$, $K=1.0$ and without feedback ($W(s)$ for comparison purposes) from all the analyzed frequency characteristics of the filters for $0.1 < K < 1.0$.

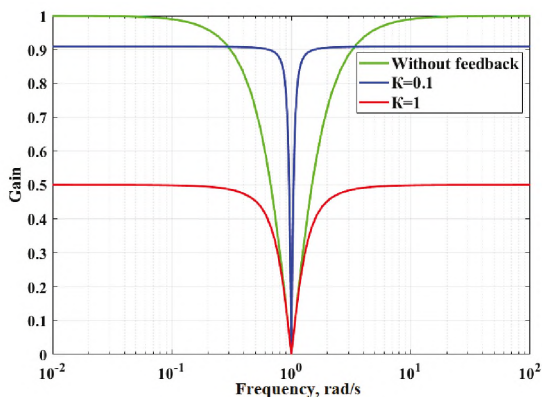


Figure 1 – Effect of the feedback loop correction coefficient on the frequency response of the notch filter

From the figure, it's easy to see that the notch filter with a $K=0.1$ correction factor in the feedback loop has a gain of 0.9 in the frequency response, while for $K=1.0$, the gain in the frequency response is 0.5. Furthermore, the filter gain of 0.9 achieved with $K=0.1$ is 1.8 times greater than the gain of 0.5 achieved with $K=1.0$ (unity negative feedback), respectively.

Furthermore, if we compare the filter frequency response characteristics, we can see that the frequency response with $K=0.1$ has a steeper roll off than with $K=1.0$ and without a feedback loop. However, a notch filter without feedback, compared to $K=0.1$ and $K=1.0$, has a frequency response gain of unity and a wide rejection band. Given a wider rejection band, this will result in a low Q factor and can significantly impact signal processing efficiency. Therefore, for a more thorough understanding and description of these effects, Table 1 presents the results of evaluating the properties of notch filters.

Table 1 – Evaluation of direct and indirect indicators of the filtration system

0,1<K<1,0	Direct and indirect indicators		
	Zeros	Poles	Transient time, s
0,1	-0±1i	-0,064±0,998 i	61,7
0,2		-0,118±0,993 i	33,7
0,3		-0,163±0,987 i	24,4
0,4		-0,202±0,979 i	20,8
0,5		-0,236±0,972 i	18,0
0,6		-0,265±0,964 i	15,3
0,7		-0,291±0,957 i	14,9
0,8		-0,314±0,949 i	12,5
0,9		-0,335±0,942 i	12,4
1,0		-0,353±0,935 i	12,2
W(s)	-0±1i	-0,707±0,707 i	7,0

The presented filter property assessment shows that, due to the decrease in the feedback correction coefficient of the rejection filters, the poles move closer to the imaginary axis (i), thus increasing the transient time. The distance between the pole and the imaginary axis for $K=0.1$ is only 0.002 units, while for a filter with $K=1.0$, this distance is 0.065 units, which provokes the formation of a long transient process with a time of $t_p=61.7$ s at $K=0.1$ compared to the filter without feedback and the filter with $K=0.1$, according to the assessment presented in Figure 2.

Moreover, the smallest distance between the pole and the imaginary axis of the notch filter at $K=0.1$ on the frequency response (Figure 3) produces a steeper roll-off and a narrow filter noise suppression band, which makes it possible to obtain a high- Q notch filter that affects the signal processing and the fulfillment of

the condition for minimizing the error $e(t)$ of the measurement estimate. Moreover, the formed distance of 0.293 units between the pole and the imaginary axis for a single-frequency Butterworth notch filter without feedback, in contrast to the notch filters with feedback under consideration, generates a gain on the frequency response equal to 1. Thus, the differences in the characteristics provide a complete basis for stating the identified features of the synthesized filters, taking into account the influence of the correction coefficient of the feedback loop at $0.1 < K < 1.0$ on the quality indicators of the system during signal processing.

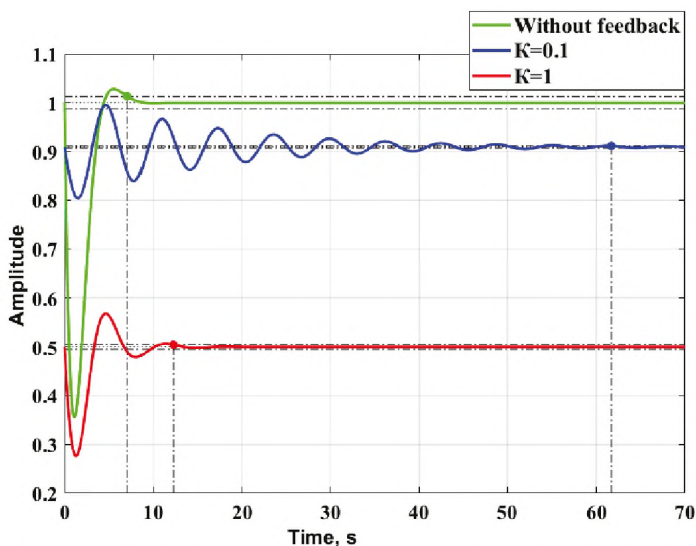


Figure 2 – Effect of the feedback loop correction coefficient on the transient response of the notch filter

In order to obtain the results of signal processing, the additive model of sinusoidal signals and its rejection filtering has the form as shown in Figure 3 for a filter with $K=0.1$.

From the above notch filtering result for $K=0.1$, it follows that the synthesized notch filter can filter out single-frequency interference of $\omega=1$ rad/s and isolate the signal's information component similar to that of the noise-free reference signal. The introduced distortion in the form of undamped oscillations for this filter should be considered inherent to this process, caused by the close proximity of the system's poles to the imaginary axis. This leads to the emergence of a long-term transient process, which also affects the signal $e(t)$ of the measurement estimation error, shown in Figure 4.

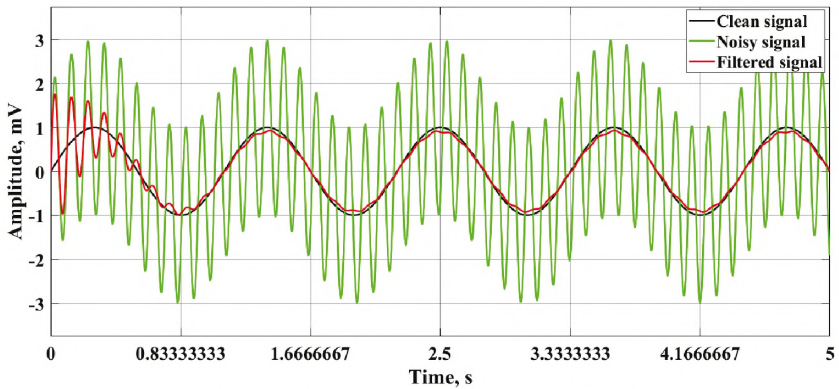


Figure 3 – Notch filtering of sinusoidal signals

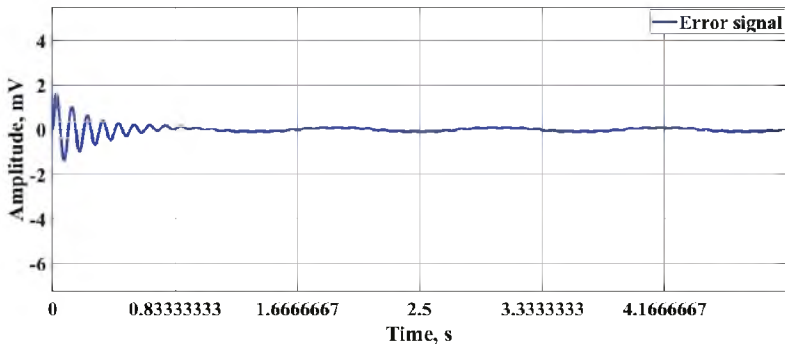


Figure 4 – Measurement estimation error

From the presented assessment it follows that the notch filter at $K = 0.1$ ensures the minimization of the measurement error of the signal components, converging to zero, and allows us to state an increase in the measurement accuracy of the components of the signal $s(t)$ under consideration. However, in order to speak about the increase in accuracy, there is a great need to conduct a quantitative assessment of such indicators that can most fully characterize the operation of the signal processing system. Such indicators can be the signal-to-noise ratio (SNR), the root-mean-square deviation (MSE), calculated between the readings of the reference and filtered noisy signal, adapted from [16]. The results of the indicator assessment are presented in Table 2.

Table 2 – Evaluation of signal processing efficiency

0,1<K<1	Direct and indirect indicators		
	SNR_before, dB	SNR_after, dB	MSE, mV
0,1	0,969	12,250	$4,795 \cdot 10^{-4}$
0,2		11,732	$4,986 \cdot 10^{-4}$
0,3		9,602	$5,633 \cdot 10^{-4}$
0,4		7,543	$6,616 \cdot 10^{-4}$
0,5		5,778	$7,555 \cdot 10^{-4}$
0,6		4,276	$8,412 \cdot 10^{-4}$
0,7		2,979	$9,185 \cdot 10^{-4}$
0,8		1,844	$9,879 \cdot 10^{-4}$
0,9		0,835	$1 \cdot 10^{-3}$
1,0		-0,069	$1,1 \cdot 10^{-3}$

The presented assessment shows that a Butterworth notch filter with $K=0.1$, compared to $K=1.0$, provides high measurement accuracy (MSE) and SNR of processed signals to single-frequency interference. It should also be noted that the lowest MSE value indicates similarity between the filtered signal and the reference signal.

The impact of the correction coefficient $0.1 < K < 1.0$ of the notch filter's negative feedback loop on signal processing performance can also be determined using a linear regression analysis of the parameters. For this analysis, the K coefficient values should be selected as the predictor, and the SNR and MSE parameters should be the focus variables of the study. The results of the analysis can be visualized using a scattergram, with the paired correlation and determination coefficients calculated, as shown in Figure 5.

The results presented in Figure 5 demonstrate a close, linear relationship between the SNR, MSE, and K , characterizing the influence of K on the performance of the signal processing system. A non-random negative correlation was found between the SNR and K at $r = -0.991$, $R^2 = 0.982$, and $p = 2 \cdot 10^{-7}$, indicating a decrease in the SNR with increasing K . A direct, non-random relationship was found between the MSE and K at $r = 0.993$, $R^2 = 0.986$, and $p = 1 \cdot 10^{-7}$, characterizing an increase in filtering error due to an increase in K . Thus, the results of the relationship assessment obtained through linear regression analysis are consistent with the data presented above.

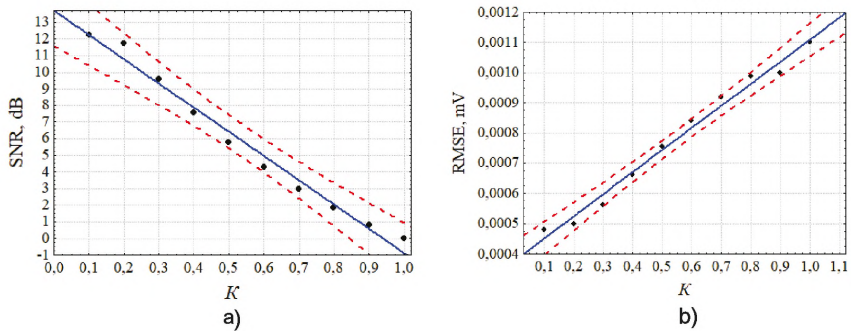


Figure 5 – Dependence of the influence of the feedback loop correction coefficient on the signal processing quality indicators: a) SNR – the ratio of the filtered sinusoidal signal to the single-frequency interference; b) MSE – the standard deviation of the signal processing results between the test and filtered signals

The scientific novelty of this research result lies in the established relationship between the SNR and the MSE of the signal-to-noise ratio and the values of the correction coefficient of the negative feedback loop of the notch filter:

- changing the coefficient values in the range from 0.1 to 1.0 changes the signal-to-noise ratio; further increasing this value leads to a decrease in the effectiveness of processing noisy measurements in terms of noise immunity;
- decreasing the correction coefficient of the feedback loop by 0.1 narrows the single-frequency interference suppression band in the internal structure of the system, thereby increasing the frequency quality factor of this filter and the effectiveness of processing noisy measurements in terms of accuracy by $4.795 \cdot 10^{-4}$ mV and noise immunity by 12 dB.

Conclusion. This article presents new performance evaluation results for a previously developed single-frequency notch filter based on the Butterworth polynomial. The effect of the negative feedback loop correction coefficient is evaluated for this second-order single-frequency notch filter. It is shown that the Butterworth single-frequency notch filter, with a feedback coefficient of $K = 0.1$, exhibits a steeper frequency response roll off, the width of which is significantly narrower than that of a filter without feedback. This paper establishes for the first time the influence of the negative feedback loop correction coefficient on the signal processing accuracy and noise immunity of a Butterworth single-frequency notch filter by an average of 12.250 dB with a non-random inverse correlation coefficient of 0.991, respectively.

Reference

- 1 Amini S., Tazehkand B. M. Design of feedback-structured IIR notch filter with transient suppression using gain variation // Biomedical Signal Processing and Control. – 2022. – T. 71. – C. 103075.
- 2 Altay Y.A., Uskenbayeva R.K., Fedorov A.V. Method for Improvement of Biosignal Measurement Accuracy in the IoB System // 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements. 2024. – P. 26-29.
- 3 Altay Y.A., Lyamin A.V., Kelemsejit N.E., Skakov D.M., “Cascade Notch Filter with a Unity Feedback and Improved Transient Response,” in Proc. CTS, 2023, paper 23.23.09, pp. 217-220.
- 4 Altay Y.A., Kremlev A.S., Zimenko K.A., “A New ECG Signal Processing Method Based on Wide-Band Notch Filter,” Proceedings of the IEEE conference Russian young researchers in electrical and electronic engineering. Saint Petersburg, Russia, 2020, pp. 1464-1469
- 5 Utegulov, B., Utegulov, A., Begentaev, M., Zhumazhanov, S., & Zhakipov, N. Method for determining parameters of isolation network voltage up to 1000 V in mining enterprises. Proceedings of the IASTED International Conference on Power and Energy Systems and Applications, PESA. - 2011. P. 50-53.
- 6 Utegulov, B., Utegulov, A., Begentayev, M., Zhakipov, N., Sadvakasov, T. Method for determining the insulation in asymmetric networks with voltage up to 1000 V in mining enterprises. Proceedings of the IASTED International Conference on Power and Energy Systems and Applications, PESA. - 2011. P. 54-57.
- 7 Utegulov B., Utegulov A., Begentayev M., Uakhitova A., Zhumazhanov S., Zhakipov N., Tleulanova G. Excitation control asynchronized synchronous compensators remedy for mains voltage fluctuations with sharply variable loads // Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Simulation, and Identification, MSI 2011 (pp. 144-146).
- 8 Utegulov B., Utegulov A., Begentayev M., Uakhitova A., Zhumazhanov S., Zhakipov N., Koftanyuk D. Establishing ceiling voltage, limit slips and inertia constant in a rotor of asynchronized synchronous compensator // Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Simulation, and Identification, MSI 2011 (pp. 147-150).
- 9 Ayazbay A.A., Balabyev G., Orazaliyeva S., Gromaszek K., Zhauyt A., “Trajectory Planning, Kinematics, and Experimental Validation of a 3D-Printed Delta Robot Manipulator,” International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2024, vol. 1, p. 113-125.
- 10 Altay Y.A. Research and development of acoustic emission signal processing methods: PhD dissertation / ITMO University. Saint-Petersburg., 2023. 270 p.
- 11 Malghan P. G, Hota M. K, “A review on ECG filtering techniques for rhythm analysis,” Research on Biomedical Engineering, 2020, vol. 5, pp. 1-16.
- Suchetha M., Kumaravel N., “Empirical mode decomposition based filtering techniques for power line interference reduction in electrocardiogram using various adaptive structures and subtraction methods,” Biomedical Signal Processing and Control, 2013, vol. 8, pp. 575-585.
- 12 Han G., Lin B., Xu Z., “Electrocardiogram signal denoising based on empirical mode decomposition technique: an overview,” Journal of Instrumentation, 2017, vol. 12, pp. 1-19.
- 13 Bui N.T., “Real-Time Filtering and ECG Signal Processing Based on Dual-Core Digital Signal Controller System,” IEEE Sensors Journal, 2020, vol. 12, pp. 6492-6503.
- 14 Rahman S., Pal S., Karmakar C. Impact and mitigation of blind filtering in automatic ECG analysis for wearable sensors //Biomedical Signal Processing and Control. – 2025. – T. 110. – C. 108294.
- 15 Altay Y.A., Ayazbay A. A. E., Fedorov A. V. Machine Learning in Predicting the Performance of Acoustic Emission Signal Filtering Methods: Association Between Predictors. Proceedings of the VI IEEE International Conference on Neural Networks and Neurotechnologies. 2025, p. 1-4.

Алтай Е.А.¹, Әблеш Ф.¹, Федоров А.В.²

¹Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

²ITMO University, Санкт-Петербург қ., Ресей

СИГНАЛДАРДЫ ӨНДЕУГЕ АРНАЛҒАН БІР ЖИІЛІКТІ СҮЗГІ

Түйіндемe. Қазіргі таңда қолданысқа ие болып келетін режекторлық сүзгілер бір мәнді жоғары жиілікті шуылды кедергілердің әсеріне өте сезімтал болып келеді. Нәтижесінде өлшенетін сигналдардың формасын бұрмаландырып ауытқуларға ұшыратады. Атап өткен ауытқу түрі қарастыруға ұсынылған мақалада қуыс жолақты бір мәнді жиілігі бар режекторлық сүзгі жүйесімен жойылады. Қуыс жолақты бір мәнді жиілігі бар режекторлық сүзгісінің жиіліктік сипаттамасы екінші дәрежелі Баттерворт көпмүшесімен аппроксимацияланған және құрамында кері байланыспен тұйықталған, ал басқада жүйелермен салыстырғанда шуылы бар өлшеулерді жоғары дәлдікпен өңдейді. Қарастырып отырған сүзгіге екінші дәрежелі көпмүшені таңдау оның максималды тегіс және симметриялы амплитуда жиіліктік сипаттамасымен, шуылдарды сүзгілеу жиілік жолағында лүпілдердің болмауымен және өз ауытқуларын аз мөлшерде бөлуімен негізделген. Жиілік облысындағы қуыс жолақты режекторлық сүзгінің басқару жүйесінің синтезі кері байланыстың коэффициентін коррекциялау диапазонында келтірілген. Осы коэффициенттің мәні $K=0,1$ болған жағдайда электрлік шуылы бар өлшемдердің өңдеу нәтижелігі жоғарлайтыны толығымен анықталып көрсетілген. Сондай-ақ бұл коэффициентпен режекторлық сүзгінің амплитудалық жиілік сипаттамасында электрлік шуылды сүзгілеу диапазонында қуыс жолақтың пайда болуын қамтамасыз етеді. Сонымен қатар режекторлық сүзгінің беріліс функциясының кері байланыс коэффициентімен коррекциялау мәндерімен сигналдардың өлшеу дәлділігін және шуылға төзімділігін анықтайтын көрсеткіштер арасында кездейсоқ емес корреляциялық байланыс анықталды. Анықталған корреляциялық байланысты шуылы бар өлшемдерді өңдеу әдісін әзірлеу кезінде қарастырып және қолдануға болады. Орнатылған байланысты математикалық статистика тұрғысынан анықтасақ, ол өлшенген сигналдарды өңдеу жүйесінің нәтижелігін толығымен растайды.

Түйінді сөздер: Сүзгі, сигналдарды өңдеу, басқару, кері байланыс, дәлділік, шуылға төзімділік.

Алтай Е.А.¹, Аблеш Г.¹, Федоров А.В.²

¹Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

²ITMO University, г. Санкт-Петербург, Россия

ОДНОЧАСТОТНЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Аннотация. Современные методы режекторной фильтрации чувствительны к влиянию высокочастотной одночастотной помехи, которая оказывает существенное искажение формы информативного сигнала. Отмеченная особенность нивелируется путем разработанной в статье системы узкополосной высокочастотной режекторной фильтрации. Узкополосный высокочастотный режекторный фильтр аппроксимирован полиномом Баттерворта второй степени и обладает свойством замкнутой цепи контура отрицательной обратной связи, что, в отличие от существующей системы, обеспечива-

ет высокоточную обработку зашумленных измерений. Выбор данного полинома второй степени обоснован его максимально плоской и симметричной амплитудно-частотной характеристикой, отсутствием пульсаций на полосе подавления помехи и пропускания сигнала, а также наделением наименьшего искажения для выбранного порядка. В рассматриваемой статье представлен результат синтеза системы управления узкополосным высокодобротным режекторным фильтром при вариации корректирующего коэффициента контура обратной связи, повышающий результативность обработки зашумленных измерений при введении значения для данного коэффициента $K = 0,1$. Выявлено, что наименьшее значение данного коэффициента в сравнении со значением, получаемым при формировании единичной обратной связи, существенно повышает значение коэффициента усиления фильтра на его частотной характеристике и тем самым обеспечивает сужение полосы подавления для повышения добротности режекторного фильтра на частоте среза помехи. Более того, обнаружена неслучайная и значимая корреляционная взаимосвязь между измеренными показателями, обусловленная понижением показателей точности и помехоустойчивости системы обработки сигнала при увеличении значений корректирующего коэффициента контура обратной связи режекторного фильтра выбранного порядка. Вместе с тем понимание обнаруженной связи, используемой при разработке метода обработки зашумленных измерений, позволит существенно улучшить точность и помехоустойчивость системы обработки сигнала. Представленные результаты, характеризующие статистически значимую и неслучайную связь, подтверждают работоспособность и функционирование системы обработки сигнала, определяющей работу высокодобротного режекторного фильтра при фильтрации одночастотной помехи.

Ключевые слова. Фильтр, обработка сигнала, обратная связь, точность, помехоустойчивость.

Авторлар туралы мәліметтер

Алтай Ельдос Алтайұлы – техника ғылымдарының кандидаты, PhD, Satbayev University-де аға оқытушы, Алматы қ., Қазақстан, aeldos@inbox.ru

Абләш Галымжан – Satbayev University-нің магистранты, Алматы қ., Қазақстан

Федоров Алексей Владимирович – техника ғылымдарының докторы, ITMO University-нің профессоры, Санкт-Петербург қ., Ресей

Сведения об авторах

Алтай Ельдос Алтайұлы – кандидат технических наук, PhD, старший преподаватель Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, aeldos@inbox.ru

Абләш Галымжан – магистрант Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

Федоров Алексей Владимирович – доктор технических наук, профессор в ITMO University, г. Санкт-Петербург, Россия

Information about the authors

Altay Yeldos Altayuli – Candidate of technical science, PhD-science, senior lecturer in Satbayev University, Almaty c., Kazakhstan, aeldos@inbox.ru

Ablesh Galymzhan – Masters Student in Satbayev University, Almaty c., Kazakhstan

Fedorov Alexey Vladimirovich – Doctor of technical science, professor in ITMO University, Saint-Petersburg c., Russia

Жидеқұлова Г. Е.¹, Бекболатов С. Б.¹, Аман А.¹, Жоранова Н.¹

¹М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., Қазақстан

МАМАНДАНДЫРЫЛҒАН САНДЫҚ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДЫ ОҚУ ПРОЦЕСІНДЕ ҚОЛДАНУ

Түйіндеме. Білім беру саласындағы цифрлық технологиялардың дамуы өзектілікпен белгіленеді және мемлекеттік деңгейде және жалпы жұртшылықпен қолдау көрсетіледі. Цифрландыру бұл «цифрлық алшақтық», «цифрлық азаматтық», «цифрлық әлеуметтенудің» жаңа әлеуметтік жағдайы. Білім берудегі негізгі өзгерістер білім беруді цифрландырумен байланысты. Цифрландыру процесінде оқыту құрылымы мен білім беру процесін ұйымдастыру түбегейлі өзгереді. Жаңа ақпараттық-коммуникациялық технологияларды пайдалану цифрлық педагогиканы одан әрі дамытудың бастапқы шарты болып табылады. Мақалада FPGA технологиялар көмегімен оқу үрдісінде қолданылатын студенттердің сабаққа қатысуын қадағалайтын программаларды ұйымдастырып, олардың пайдалы жағдайлары ұсынылуда. Компьютерде FPGA технологияларымен құрылған программалар арқылы студенттердің сабаққа қатысуын немесе студенттерді оқытушылардың бағалауын автоматты түрде ұйымдастыруын, көтеру үшін пайдалануға болады. Осы тұрғыда FPGA технологиялар негізінде программалар жасаудың тәжірибелік қолданыс көрінісі көрсетілген.

Түйінді сөздер: FPGA технологиялар, программа, ендірілген жүйелер, цифрландыру, MQTT сервері, Arduino Mega atmega 2560 микроконтроллері, IBM Rational Rose CAS, шабуылдарды тану, Python.

Кіріспе. Зерттеліп отырған Мамандандырылған сандық құрылғыларды оқу процесінде қолдану жүйесін құру мәселе бойынша Цифрлық технологияларды іске асыру білім беру саласын да айналып өткен жоқ. 2020 жылғы 4 наурызда Қазақстан президенті Қасым-Жомарт Тоқаев «Цифрлық Қазақстан» мемлекеттік бағдарламасын жүзеге асыру жөнінде кеңесінде: «озық телекоммуникациялардың көмегімен біз азаматтарымызға цифрлық әлемнің барлық мүмкіндіктерін ашамыз. Бұл тек заманауи қызметтер, онлайн білім беру, телемедицина ғана емес, бұл өте маңызды, біз оны түсінеміз... Біздің аумағымыздағы үлкен еліміз үшін таланттардың, құзыреттердің, идеялардың мұндай бірлестігі - орасан зор серпінді ресурс» [1].

Әдістемелік тұрғыдан білім беру жүйесін цифрландыру жаңа құзыреттілік тәсілді қолдана отырып, жаңа білім беру стандарттарына сүйенеді. Оқу материалдарын жасау құралы, тиімді оқыту үшін студенттердің мазмұны мен білімін тиімді жеткізу құралы қажет. Ресейлік жоғары оқу орындары халықаралық білім беру платформаларының ресурстарын өз әзірлемелерінің маз-

мұнымен біріктіретін екі компонентті ақпараттық-білім беру ортасын пайдаланады, бұл өзінің IT-өлеуетін дамытуға ықпал етеді. Ақпараттық-білім беру ортасының білім беру процесінің қазіргі заманғы цифрлық базасын енгізу қажет. Тиімді ЖОО іске асыру кез келген ЖОО дамуының негізі болып табылады. Жоғары білім беруді цифрландыру профессор-оқытушылар құрамына қойылатын біліктілік талаптарына өзгерістер енгізеді. Оқытушылар жұмысын жеңілдететін цифрлық технологияларды қолдана бастайды.

Білім беруді цифрландыруға байланысты білім берудегі өзгерістер еңбек нарығында терең өзгерістерге әкеледі. Бұл білім беру процесін одан әрі қайта құруға себеп болады. Әлемнің барлық жоғары оқу орындарының электрондық кітапхана ресурстары, сондай-ақ үздік оқытушылардың Оқу материалдары барлық білім алушылар үшін қолжетімді болады. Алдағы жылдары кез келген тілден мәтіндер мен сөйлеулерді автоматты түрде аударудың осындай жүйелері өзірленіп, енгізілетін болады. Мұндай әрекеттер білім беру процесінің елеулі қайта құрылуына, мұғалімнің рөлін өзгертуге әкеледі, ол болашақта осы немесе басқа материалды түсіндірмейді, бірақ осы материалдың орналасуын табуға және оны түсінуге көмектеседі.

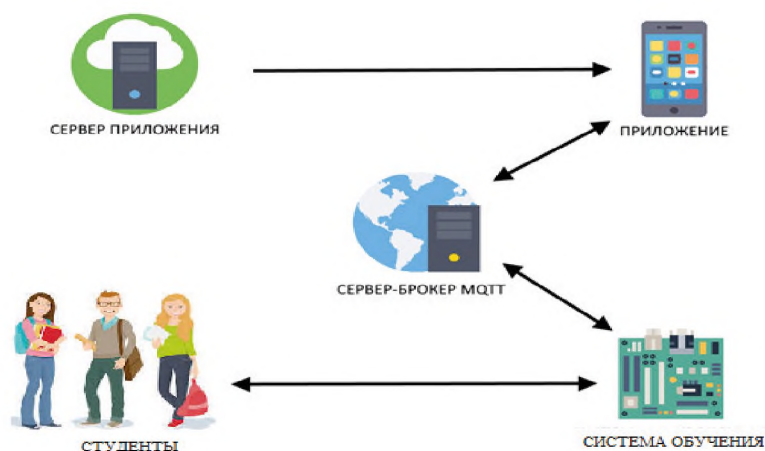
Зерттеудің мақсаты – цифрландыру процесінде оқыту құрылымы мен білім беру процесін ұйымдастыру бағытында өзгерістер енгізе отырып, оқу үрдісінде оқытушылардың уақытын үнемдеу, студенттердің сабаққа қатысуын оңтайландыру мақсатында және ата-аналардың балаларының сабаққа қатысуын бақылау мүмкіндігін беретін мамандандырылған сандық құрылғыларды оқу процесінде қолдану жүйесі құру.

Материалдар мен әдістер. Кез-келген заманауи компьютерлік жүйе мамандандырылған басқару шешімдерінің екі негізгі бағытына негізделген: бағдарламаланатын логикалық контроллерлер және микроконтроллерлер. Бұл әртүрлі функцияларды орындайтын классикалық дербес компьютер емес, көлемді нәрсе. Оның микропроцессоры немесе микроконтроллері бір немесе бірнеше нақты тапсырмаларды орындау үшін алдын ала бағдарламаланған. Кейбір модельдердің мақсатына қарай өздерінің бағдарламалық жасақтамалары, яғни микробағдарламалары болуы мүмкін. Білім беру нарығының жаһандануына байланысты білім беру жүйесіне қойылатын талаптардың жаңа жиынтығы қалыптасуда. Негізгі талаптардың бірі-нақты және тез өзгеретін білім беру қызметтері нарығында жұмыс істеу мүмкіндігі. Мұндай қабілет басқарудың процесске бағытталған құрылымы және мекеме ішіндегі автоматтандырылған бизнес-процестері бар жоғары оқу орындарында қамтамасыз етілуі мүмкін. Ақпараттық революция дәуірінде цифрлық білім беру технологияларын қолданудың артта қалуы білім беру сапасының күрт төмендеуіне және қоғамдық қажеттіліктерге қанағаттанбауға үлкен қауіп төндіреді.

Ендірілген жүйелер (embedded system) – олар басқаратын құрылғыда жұмыс істеуге арналған арнайы жүйелер. Мұнда барлық түйіндер келісілген және бекітілген жоспар негізінде ережелер жиынтығына сәйкес бірлесіп жұмыс істейді. Олардың көмегімен олар бір немесе бірқатар тапсырмаларды ұйымдастырады және жүзеге асырады. Олар сағат сияқты жұмыс істейді:

егер компоненттердің бірі өз міндеттерін орындауды тоқтатса, өнім жұмыс істей алмайды. Яғни, барлық элементтер бір-біріне тәуелді. Тек сағаттық бөліктердің орнына аппараттық және бағдарламалық жасақтама микропроцессорлық embedded жүйесінде біріктіріледі. FPGA сияқты жан-жақты басқа технологияны елестету қиын. FPGA-Field - Programmable Gate Array, яғни бағдарламаланатын логикалық матрица (PLM), бағдарламаланатын логикалық интегралды схема (plis). Бұл логикалық элементтер, триггерлер, кейде жедел жады және олардың арасындағы бағдарламаланатын электр байланыстары бар чип жасайтын технология. Бұл жағдайда FPGA бағдарламалауы бағдарлама емес, электр тізбегін жасау сияқты көрінеді. Мен бұл технологияны бұрыннан қолданамын және олардың күрделілігіне байланысты менің көзқарасым бойынша ең пайдалы қосымшаларды сипаттауға тырысамын [2].

Ең алдымен, жүйенің жұмыс жасау алгоритмі 1-ші суретке сәйкес ойластырылды. Жүйеден жұмыс браузерді қолдайтын құрылғы арқылы қосымшаны серверден орнату қажет екендігінен басталады. Әрі қарай, қосымшаның көмегімен сіз MQTT серверінен деректерді жібере және ала аласыз. Сондай-ақ, студенттердің сабаққа қатысуын немесе студенттердің бағалануын бақылау жүйесі деректерді серверден жібереді және оқиды. Алынған мәліметтерге байланысты Мамандандырылған сандық құрылғыларды оқу процесінде қолдану жүйесі студенттердің сабаққа қатысуын немесе студенттердің бағалануын басқара алады.



1-сурет - Жүйенің жұмыс жасау алгоритмі

Құрылғы мен қолданба арасында деректерді бөлісу үшін жеңіл протокол қажет, өйткені HTTP осы мақсаттар үшін өте ауыр протокол, содан кейін MQTT протоколы өте қолайлы.

MQTT ХАТТАМАСЫ 2-ші суретке сәйкес үш объектіден тұрады:

- баспагер - белгілі бір оқиғалар орын алған кезде брокерге ақпарат жіберетін MQTT клиенті;
- MQTT брокер-сервері, ол баспагерлерден ақпарат алады және оны тиісті ізбасарларына жібереді;
- абонент - MQTT клиенті, ол тиісті брокерге жазылғаннан кейін көп жағдайда «тыңдайды» және брокерден хабарламаларды қабылдауға және өңдеуге дайын.



2-сурет - MQTT хаттамасының схемасы

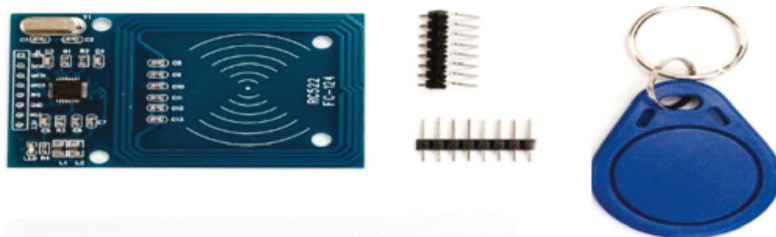
Arduino Mega atmega 2560 микроконтроллеріне салынған (техникалық сипаттама). Тақтада 54 сандық кіріс / шығыс (оның 14-ін PWM шығысы ретінде пайдалануға болады), 16 аналогтық кіріс, 4 UART сериялық порты, 16 МГц кварц генераторы, USB қосқышы, қуат қосқышы, ICSP қосқышы және қайта жүктеу түймесі бар. Жұмыс істеу үшін платформаны компьютерге USB кабелі арқылы қосу керек немесе AC/DC адаптерін немесе батарея жинағын пайдаланып қуат беру керек. Arduino Mega 2560 Uno немесе Duemilanove платформаларына арналған барлық кеңейту тақталарымен үйлесімді (3-сурет).



3-сурет - Arduino Mega

Радиожилікті Сәйкестендіру (RFID) — радиожилік байланыс арнасы арқылы объектілерді контактісз сәйкестендіру технологиясы. Объектілерді

сәйкестендіру әрбір электрондық белгісі бар бірегей идентификатор бойынша жүргізіледі. Оқырман белгілі бір жиіліктегі Электромагниттік толқындарды шығарады. Белгілер жауап ретінде ақпаратты жібереді - сәйкестендіру нөмірі, жад деректері және т. б. (4-сурет).

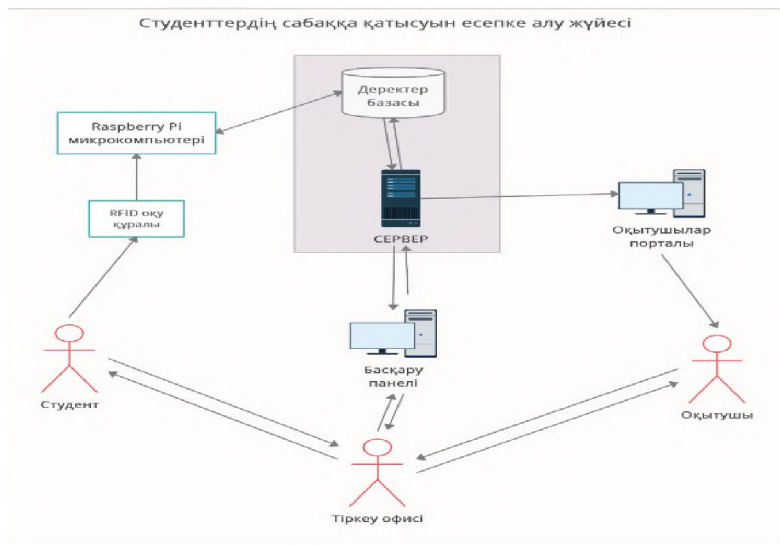


4-сурет - RFID модуль RC522

IBM Rational Rose CASE құралы жұмыс істеген сәттен бастап үлкен эволюциядан өтті және қазіргі уақытта бағдарламалық жүйелердегі архитектураларын жобалауға, талдауға, модельдеуге және дайындауға арналған заманауи біріктірілген құралдар жинағы болып табылады. Дәл осы жағдайда IBM Rational Rose бағдарламасында UML тілі осы құралдар жинағының танымалдылығы мен стратегиялық перспективасын анықтайтын бағдарламалық жүйелерді визуализациялау және дамытудың негізгі технологиясы болды.

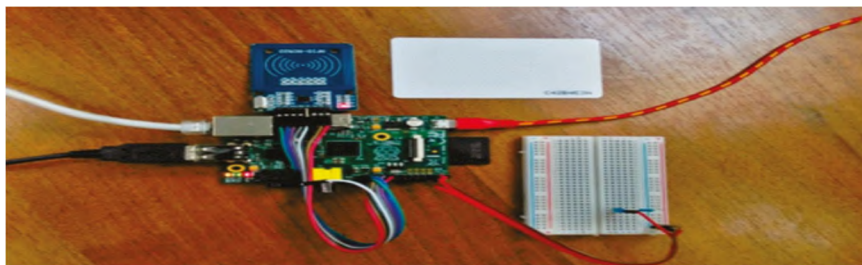
Жалпы IBM Rational Rose өнімінде олар қамтамасыз ететін мүмкіндіктер ауқымында ерекшеленетін құралдың әртүрлі мүмкіндіктері бар. Негізгі құрал қазіргі уақытта IBM Rational Rose Enterprise Edition болып табылады, ол ең толық жоба жасауға мүмкіндік береді. Бұл бағдарламаның ең жақсы бағыты функционалдық мүмкіндіктері өте көп.

Варианттар диаграммасы модельдің жоғары деңгейдегі концептуалды көрінісі болып табылады, сондықтан ол тым көп қолдану жағдайлары мен актерлерімен қамтылған. Кейіннен құрастырылған диаграмманы пайдалану жағдайлары мен актерлер сияқты жаңа элементтерді қосу немесе оларды жою арқылы өзгертуге болады. Ашу түймешігін басқаннан кейін қосылған файлдың белгішесі жоба шолғышында сәйкес пайдалану жағдайының астында пайда болады. 5-ші суретіне сәйкес студенттердің сабаққа қатысуын есепке алу, бағалау процесі жүйесінің сәулеті келтірілген [4].



5-сурет - Студенттердің сабаққа қатысуын есепке алу жүйесінің сәулеті

Нәтижелер. Студенттердің сабаққа қатысуын есепке алу бойынша элементі - бір тақталы микрокомпьютерлері, ол ұзақ уақыт бойы автономды жұмыс істейді, осылайша жүйелілік пен қателердің болмауына кепілдік береді. Жүйе бірнеше функцияларды орындауға мүмкіндік береді, мысалы: кіруді шектеу сәйкестендіру; уақытты есепке алу; дерекқорға ақпарат енгізу; кез келген құрылғыдан деректерді бақылау. Arduino бағдарламасына кітапхана жүктеу қажет. Жүйенің негізгі бөліктері Raspberry Pi микрокомпьютері мен RFID-RC522 құрылғысы болып табылады. Олардың қосылу схемасы сызылып, бағдарлама Raspberry Pi микрокомпьютеріне жүктелді. Жүйе сызбасына сәйкес жүйе жиналып тестілеу кезеңінен өткізілді (6-сурет). Осы құрастырылған жүйе бойынша арнайы пәнге студенттердің сабаққа қатысуын есепке алу бақыланды. Жүйенің қолданыста болу нәтижесінде ата-аналарға да өз балаларын бақылау мүмкіндігі туындайды. Базаға түскен деректер белгілі уақыт аралығына дейін сақталады, студенттердің сабаққа келу, келмеуі туралы мәліметтерді кез-келген уақытта көруге болады.

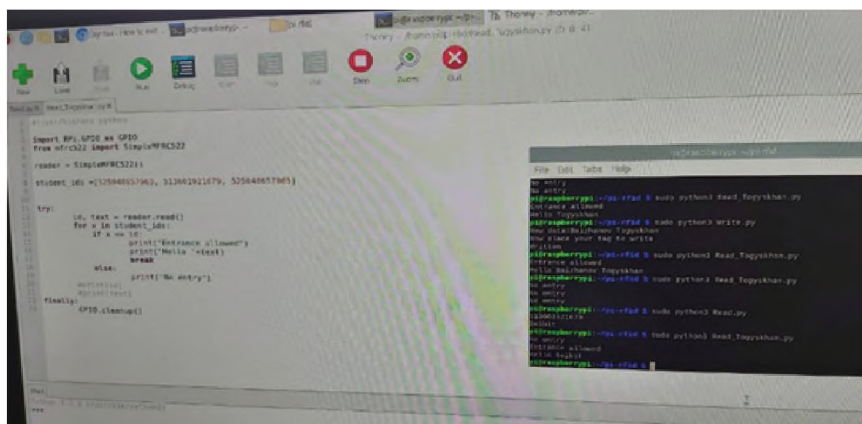


6-сурет - Студенттердің сабаққа қатысуын есепке алу жүйесінің жиналған көрінісі.

Студент туралы ақпараттар карточкаға RFID тегі арқылы енгізіледі (Әр студентке жеке-жеке ИИН номері мен аты-жөні енгізіледі) содан кейін базаға жіберіледі.

Осыдан кейін студент өз карточкасын RFID RC522 құрылғысымен тексерістен өткізгеннен кейін, программа бойынша базадан тексереді, егер базаға студент тіркелмеген болса, онда «Сіз тіркелмегенсіз» - деп, есепке алмайды.

Бірінші қолданушы ретінде танылған студент әрекеттеріне сабаққа қатысуын тіркеу және өзінің жеке есеп бетін көру кіреді. Оқытушы деп аталатын екінші қолданушы әрекеттеріне студенттерді қатысуын тіркеу, деректерді өзгерту, іздеу және есеп бетін құрастыру кіреді. Администратор әрекеттеріне деректерді өзгерту, іздеу және есеп парағын құру кіреді. 7-ші суретке сәйкес программаның компьютерде жұмыс істеу көрінісі келтірілген.



7-сурет - Программаның компьютерде жұмыс істеу көрінісі

Мамандандырылған сандық құрылғыларды оқу процесінде қолдану жүйесін құру жүйесінің негізгі элементі - Arduino Mega бір тақталы микрокомпьюте-

рімен, RFID RC522 барлық қосалқы құрылғылармен жинақталып, программамен басқару көрінісін ұйымдастырып көрсетті.

Талқылау. Талдау нәтижелері бойынша Arduino Mega микрокомпьютері студенттерді есепке алу жүйесінде қолданудың тиімділігі үшін таңдалды. Arduino Mega басқа микрокомпьютерлерге қарағанда бірнеше артықшылықтарға ие, олардың кейбіреулері: төмен құны (220-дан бастап); төмен қуат тұтыну (көптеген жұмыстар үшін желдеткіш немесе радиатор қажет емес); процессор және графикалық негізгі жад; бүкіл әлем бойынша кең қол жетімділік; жақсы құжаттама: схемалық диаграммадан көптеген бағдарламалардың бастапқы кодына дейін; өзірлеушілердің, пайдаланушылардың және қосымша жабдықты жеткізушілердің үлкен экожүйесі; үшінші буын дизайны; өндіруші (жеті жылдан астам); операциялық жүйенің бірнеше нұсқалары бар, олардың көпшілігі ашық бастапқы болып табылады және лицензиялау шығындарын қажет етпейді.

Қорытынды. Қорытындылай келе, ғылыми жұмыс білім беру саласындағы цифрлық технологиялардың дамуы өзектілікпен белгіленеді және мемлекеттік деңгейде және жалпы жұртшылықпен қолдау көрсетіледі. Цифрландыру бұл «цифрлық алшақтық», «цифрлық азаматтық», «цифрлық әлеуметтенудің» жаңа әлеуметтік жағдайы. Цифрландыру процесінде оқыту құрылымы мен білім беру процесін ұйымдастыру бағытында өзгерістер енгізе отырып, оқу үрдісінде оқытушылардың уақытын үнемдеу, студенттердің сабаққа қатысуын оңтайландыру мақсатында және ата-аналардың балаларының сабаққа қатысуын бақылау мүмкіндігін беретін мамандандырылған сандық құрылғыларды оқу процесінде қолдану жүйесі құрылды. Жұмыста келесі мәселелер орындалды: мамандандырылған сандық құрылғылардың таңдау объектісі толық сипатталды; жүйеге қажетті техникалық - құралдарын таңдалды; мамандандырылған сандық құрылғыларды оқу процесінде қолдану жүйесінің алгоритмі және бағдарламасын ұйымдастырылды.

Әдебиеттер

- 1 ҚР Президентінің 2020 жылғы 04 наурызда Мемлекет басшысы «Цифрлық Қазақстан» атты Қазақстан халқына Жолдауы: https://www.akorda.kz/kz/events/akorda_news/meetings_and_sittings/ memleket-basshysy-cifrylyk-kazakstan-memleketitik-bagdarlamasy-nzhuzege-asyru-zhoninde-kenes-otkizdi
- 2 Блум Джероми. Изучаем Arduino. Инструменты и методы технического волшебства. - БХВ-Петербург, 2018. – 336с.
- 3 Gaston C. Hillar. MQTT Essentials - A Lightweight IoT Protocol. - Packt Publishing, 2017 – 280с.
- 4 Айвалиотис Димитрий. Администрирование сервера NGINX. - ДМК Пресс, 2016. – 288 с.

References

- 1 Address of the President of the Republic of Kazakhstan to the people of Kazakhstan entitled "Digital Kazakhstan" dated March 4, 2020 (in Kaz.): <https://www.akorda.kz/kz/events/>

akorda_news/meetings_and_sittings/ memleket-basshysy-cifrylyk-kazakstan-memlekettik-bagdarlamasy-zhuzege-asyru-zhoninde-kenes-otkizdi

2 Bloom Jeremy. I am studying Arduino. Instruments and methods of technical magic. - BHV-Petersburg, 2018. – 336 p. (in Engl.).

3 Gaston C. Hillar. MQTT Essentials - A Lightweight IoT Protocol. - Packt Publishing, 2017 – 280c.

4 Aivaliotis Dimitri. NGINX Server Administration. - DMK Press, 2016. – 288 p. (in Russ.).

Жидекулова Г.Е.¹, Бекболатов С.Б.¹, Аман А.¹, Жоранова Н.Ж.¹

¹Таразский университет имени М.Х. Дулати, г. Тараз, Казахстан

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Аннотация. Развитие цифровых технологий в сфере образования характеризуется актуальностью и поддерживается на государственном уровне и широкой общественностью. Цифровизация это новый социальный статус «цифрового разрыва», «цифрового гражданства», «цифровой социализации». Основные изменения в образовании связаны с цифровизацией образования. В процессе цифровизации принципиально меняется структура обучения и организация образовательного процесса. Использование новых информационно-коммуникационных технологий является исходным условием дальнейшего развития цифровой педагогики.

В статье представлены полезные условия для организации программ, отслеживающих посещаемость учащихся, использующих в учебном процессе с помощью FPGA технологий. Программы, созданные с помощью технологий FPGA на компьютере, могут использоваться для автоматического повышения посещаемости студентов или автоматической организации оценок студентов преподавателями. В этом контексте показано практическое применение разработки программ на основе технологий FPGA.

Ключевые слова: FPGA технологии, программа, встроенные системы, оцифровка, сервер MQTT, микроконтроллер Arduino Mega atmega 2560, IBM Rational Rose CAS, распознавание атак, Python.

* * *

Zhidekulova G.E.¹, Bekbolatov S.B.¹, Aman A.¹, Zhoranova N.Zh.¹

¹Taraz University named after M.Kh. Dulati, Taraz c., Kazakhstan

USE OF SPECIALIZED DIGITAL DEVICES IN THE LEARNING PROCESS

Abstract. The development of digital technologies in the field of education is characterized by relevance and is supported at the state level and by the general public. Digitization is a new social status of «digital divide», «digital citizenship», «digital socialization». The main changes in education are connected with digitalization of education. In the process of digitization, the structure of education and the organization of the educational process fundamentally change. The use of new information and communication technologies is a prerequisite for the further development of digital pedagogy. The article presents useful conditions for the organization of programs that monitor the attendance of students using FPGA technologies in the educational process. Programs created with the help of FPGA technologies on a computer can be used for automatic increase of attendance of students or

automatic organization of evaluations of students by teachers. In this context, the practical application of program development based on FPGA technology is shown.

Keywords: FPGA technology, program, embedded systems, digitization, server MQTT, microcontroller Arduino Mega atmega 2560, IBM Rational Rose CAS, name recognition, Python.

Авторлар туралы мәліметтер

Жидеқұлова Гүлқыз Егенқызы – техника ғылымдарының кандидаты, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының доценті, корреспондент-автор, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., Қазақстан, gul2006@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6962-2188>

Бекболатов Самат Берікұлы – техника ғылымдарының магистрі, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының аға оқытушысы, автор, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., Қазақстан, sake929224@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6127-5249>

Жоранова Нұргүл Жоранқызы – техника ғылымдарының магистрі, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының аға оқытушысы, автор, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., Қазақстан, zhoranova71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0006-6999-3845>.

Аман Абылай – 6B06116-Компьютерлік жүйелер мен желілерді әкімшіліктеу, басқару және қорғау мамандығының 2 курс студенті, автор, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., Қазақстан,

Информация об авторах

Жидекулова Гүлқиз Егеновна – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, корреспондент-автор, Таразский университет имени М.Х. Дулати, г. Тараз, Казахстан, gul2006@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6962-2188>

Бекболатов Самат Берикович – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры информационных систем, автор, Таразский университет имени М.Х. Дулати, г. Тараз, Казахстан, sake929224@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6127-5249>

Жоранова Нургуль Жорановна – магистр технических наук, старший преподаватель кафедра информационных систем, автор, Таразский университет имени М.Х. Дулати, г. Тараз, Казахстан, zhoranova71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6127-5249>.

Аман Абылай – студент 2 курса специальности 6B06116 - Администрирование, управление и защита компьютерных систем и сетей, автор, Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

Information about authors

Zhidekulova Gulkiz Egenovna – candidate of technical sciences, associate professor Department of Information Systems, Taraz University named after M.Kh. Dulaty, Taraz c., Kazakhstan, gul2006@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6962-2188>

Bekbolatov Samat Berikuly – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer Department of Information Systems, Author, Taraz University named after M.Kh. Dulaty, Taraz c., Kazakhstan, sake929224@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6127-5249>

Zhoranova Nurgul Zhorankyzy – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer Department of Information Systems, Author, Taraz University named after M.Kh. Dulaty, Taraz c., Kazakhstan, zhoranova71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6127-5249>

Aman Abylai – 2nd year student of the specialty 6B06116, Administration, management and protection of computer systems and networks, Author, Taraz University named after M. Kh. Dulati, Taraz c., Kazakhstan

Akyn B.K.¹, Abdurazakova K.Yu.²

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty c., Kazakhstan

²Tashkent State University of the Uzbek Language and Literature named after Alisher Navoi, Tashkent c., Uzbekistan

THE HISTORY OF THE EMERGENCE AND DEVELOPMENT OF ISLAM IN JAPAN

Abstract. This paper provides a historical and contemporary analysis of the spread of Islam in Japan as a unique example of the interaction between a world religion and a society with a long tradition of religious homogeneity and cultural self-sufficiency. The paper examines the stages of Islam's penetration into the country, from the first trade and diplomatic contacts in the 19th century to the formation of stable Muslim communities in the 21st century. A particular focus of this study is the Japanese state's policy towards the Islamic world in various historical periods, ranging from the era of isolation (*sakoku*) and the Meiji Restoration to the globalization processes of the late 20th and early 21st centuries. The activities of Islamic organizations, transnational ties, demographic changes, and the peculiarities of the perception of Islam in Japanese society are analyzed. The study demonstrates that the development of Islam in Japan is a complex process of adaptation of religion in a specific sociocultural and political context, reflecting the transformation of the country's foreign policy and cultural strategies.

Keywords: Japan; Islam; religious minorities; Muslim communities; history of Islam.

Introduction. The history of Islam in Japan is a unique case study of interaction between a relatively homogeneous society and a global religion. Japan's encounter with Islam was initiated by commercial interactions, diplomatic relations, and educational exchanges. Despite its small size, Islam has had a significant impact on the development of cultural ties, transnational communications, and Japan's foreign policy. The examination of this phenomenon offers insights into the dynamics of religion in a non-denominational, high-tech society and provides an opportunity to analyze Japanese-Muslim relations within a global historical context.

Japan has its own distinct approach to Islam, just like every other country. Islam, unlike Buddhism and Christianity, did not become a prominent religion in Japan until the late 19th century. This was after a prolonged period of self-isolation during the Tokugawa era. The *sakoku* policy, which persisted for approximately 250 years, restricted external contact and impeded the spread of new religious ideologies. This situation changed significantly during the Meiji Restoration in the latter half of the nineteenth century, a period marked by Japan's engagement with the global community. Japan began establishing political, economic, and cultural

ties with other countries, including the Ottoman Empire and Muslim regions in Southeast Asia. It was during this period that the initial steps toward Islamizing Japan were taken [1].

During the first half of the 20th century, the dynamic between Japan and the Islamic world underwent a marked shift towards increased systematic relations. In the aftermath of the Russo-Japanese War and World War I, the Japanese state and military initiated a strategic initiative to cultivate ties with Muslim communities, acknowledging the significance of the Islamic world within the broader context of global politics. These contacts included interactions with anti-British movements in India, Tatar Muslims in Russia, and other transnational networks. Consequently, Islam came to be regarded not solely as a religious phenomenon, but also as a component of international relations and diplomacy [2].

Following the 1973 oil crisis, Islamic preaching (da'wa) in Japan experienced a resurgence, marking a significant shift in the nation's religious landscape. The strengthening of economic ties with Middle Eastern countries was a key factor in the growth of the Muslim population and the development of religious infrastructure. While there were only three mosques in the country prior to World War II and four by the early 1980s, by 2021, this number had surpassed 130. Concurrently, the Muslim population expanded, surpassing 200,000 by the end of 2020. A significant portion of this population is made up of foreign workers, students, and families participating in long-term programs. There has been a notable increase in the number of Indonesian Muslims participating in qualification programs. At the same time, the number of Japanese people who have chosen to embrace Islam has been increasing.

The contemporary Muslim community in Japan is a religious minority, accounting for around 1% of the population, alongside new religious movements such as Happy Science and Soka Gakkai International. In many ways, Muslims are an «invisible community». They are not always clearly reflected in public discourse, yet they play an instrumental role in shaping the diversity of the modern Japanese religious landscape. Islam has become an integral part of major cities' urban landscapes, as evidenced by the emergence of halal shops, Islamic cultural centers, educational initiatives, Japanese imams, and active communities.

Historiographically, the study of Islam in Japan has developed unevenly. Pre-war materials, including the works of Okawa Shumei (Kaikyō Gairon) [3], Matsuda Hisao, and Kobayashi Hajime (Chūō Ajiashi), as well as archives from the Meiji-Shōwa period, remained on the periphery of academic attention for a considerable duration. Since the conclusion of the 20th century, the topic has garnered increased interest from the Japanese and international academic communities. Islam in Japan is currently being studied from an interdisciplinary perspective, combining elements of history, religious studies, cultural studies, and international relations. The development of Islam in Japan is an example of how a global religion adapts to a specific sociocultural and political context.

The goal of this article - is to examine the historical progression of Islam in Japan, from the period of isolation to the present, by looking at how the Muslim

community adapted, the impact of international interactions, and the unique way Islam is perceived in Japanese society.

Research methods. This study employed a combination of historical, scientific, and sociocultural methods, which allowed for a comprehensive analysis of the processes of perception and development of Islam in Japanese society from the late 19th to the early 21st century.

1. The present study employs a historical-analytical method.

The historical-analytical approach was utilized to examine the chronology of the emergence of Islam in Japan, its subsequent spread, and the formation of Muslim communities. The analysis was based on a variety of primary sources, including diplomatic reports, archival documents, newspapers and magazines from the 19th and 20th centuries, travelers' memoirs, information about the first Japanese converts, and historical studies by Japanese and foreign scholars. The implementation of this methodology has yielded the following outcomes:

The objective is to establish the sequence of diplomatic, trade, and cultural contacts between Japan and the Islamic world. It is imperative to delineate the historical trajectory of the establishment of Muslim communities and to elucidate the foundational institutions that have facilitated their development. It is imperative to ascertain the correlation between Japan's foreign policy interests and the advancement of Islamic infrastructure within the nation.

2. The following is a description of the source analysis method.

Source analysis was employed to critically assess the reliability and completeness of historical sources. A particular focus was allocated to the comparison of Japanese and foreign materials, encompassing the following:

- Publications in Japanese periodicals from the 19th and 20th centuries.
- Areas of research include scientific works on Islamic studies and Oriental studies.

This approach facilitated the determination of reliability regarding the information concerning the initial interactions, the conversion of Japanese individuals to Islam, the formation of Islamic institutions, and the demographic evolution of the Muslim community.

3. Comparative-historical method

The present study utilized a comparative historical analysis to examine the similarities and differences in the propagation of Islam in Japan in relation to analogous processes observed in East and Southeast Asia. This methodological approach facilitated the identification of distinctive features within the Japanese Islamic tradition, which can be attributed to the following factors:

- An examination of the distinctive characteristics that define Japanese religious culture.
- An examination of Sakoku and the late opening of Japan to the outside world.

The present study will examine the influence of foreign policy and migration factors.

4. The following essay will present an analysis of sociocultural factors.

The sociocultural method has enabled researchers to study the following: the

perception of Islam by Japanese society; the image of Islam in the media and cultural texts; and the role of globalization processes in the formation of the modern Muslim community.

5. A multidisciplinary approach is employed.

The present study employs an interdisciplinary approach, integrating historical analysis, sociological inquiry, religious studies, oriental studies, and political science. This methodological approach enables us to not only reconstruct the chronology and facts, but also to understand the cultural, political, and ideological contexts that influence the perception of Islam in Japanese society.

The results of the research and the ensuing discourse surrounding those results:

1. Historical and religious background and perception of Islam in Japanese society

1.1. Islam and its perception in Japanese society

Islam originated in the 7th century on the Arabian Peninsula and spread over several decades to the Middle East, South and Central Asia, and North Africa. Today, Islam ranks second in terms of the number of believers after Christianity, with more than 1.8 billion followers worldwide [4].

For Japanese society, Islam remains largely an «external» religion, little studied and insufficiently represented in the country's cultural memory. This is due to a combination of historical, cultural, and socio-psychological factors. Historically, Japan was isolated for a long time, and religious life was shaped by the syncretism of Shintoism and Buddhism, which created a flexible religious tradition that did not require strict adherence to dogmatic norms.

The perception of Islam in modern Japanese society remains ambiguous. Popular culture and the media often associate Islam with terrorism or military conflicts, creating a wary and prejudiced attitude. In addition, Islam requires strict rituals and behavioral norms, which are perceived by the Japanese as excessively rigid and alien. The main dogmatic elements of the religion include the «six beliefs» (belief in Allah, angels, prophets, holy books, life after death, and predestination) and the «five pillars» (shahada – testimony of faith, salat – prayer, zakat – almsgiving, saum – fasting, and hajj – pilgrimage). These norms form the framework of everyday Muslim life and create a cultural gap in the perception of the Japanese audience.

The phenomenon of globalization, which has been prominent in the 20th and 21st centuries, has played a role in the migration of Muslims to regions previously unconnected with Islamic civilization, including Japan. This necessitated the adaptation of Islamic law (fiqh) and ritual practices to multicultural contexts. The Japanese encounter with Islam has manifested in diverse forms, ranging from the perception of religion as an external phenomenon to endeavors to study it and partial cultural acceptance.

1.2. Historical background and first contacts with the Islamic world

The initial interactions between Japanese individuals and Muslims are believed to have occurred during the 17th–19th centuries, primarily through commercial

trade and diplomatic exchanges. During the Edo period (1603–1868), Japanese merchants cultivated commercial relationships with Muslims through China and Southeast Asia. These contacts were economically motivated, yet they established the conditions for the initial cultural and religious interactions.

With the advent of the Meiji period (1868–1912) and the Restoration, Japanese diplomacy experienced a marked increase in activity, as evidenced by the dispatch of representatives to the Ottoman Empire and the Muslim regions of Asia. These contacts contributed to the formation of an initial understanding of Islamic culture and religion. The period known as the Meiji Restoration marked a significant turning point in Japan's engagement with the global community, marking the culmination of two centuries of isolationist policies and heralding the onset of a new era of international interaction. This pivotal moment in Japan's history coincided with the flourishing of trade and diplomatic relations with Muslim countries.

The historical incident of the Ottoman frigate *Ertugrul* sinking off the coast of Wakayama in 1890 possesses a unique and profound symbolic significance. Among those who accompanied the survivors was the journalist Noda Shōtarō, who converted to Islam and thus became the first documented Japanese Muslim. This incident not only initiated direct contact between the Japanese and Islamic civilizations, but also shaped a positive image of the Ottoman Empire in Japanese society, which had long-term cultural and diplomatic consequences [5].

1.3. The development of Islam in Japan in the first half of the 20th century (1900–1945)

1.3.1. The preparatory period (1900–1930)

At the onset of the 20th century, Japan experienced an expansion of its foreign policy horizons, a development of significant historical import. In the aftermath of its triumph in the Russo-Japanese War (1904–1905), Japan attained international recognition and embarked on a systematic study of Islamic regions, recognizing their strategic importance. Instruments of foreign policy strategy included diplomatic missions, participation in international conferences, and support for Muslim leaders.

Concurrently, the initial Muslim communities in Japan were established, predominantly by Tatar immigrants who arrived subsequent to the Russian Revolution. The establishment of mosques and Islamic cultural centers was initiated. Furthermore, publishing activities were undertaken. Concurrently, Japanese researchers initiated a concerted examination of Islamic literature, publishing translations of the Quran and works on the history of Muslim countries. The principal researchers of this era were Okawa Shumei, Matsuda Hisao, and Kobayashi Hajime, who interpreted Islam through the lens of Japanese civilizational tradition.

Concurrently, the first Japanese individuals underwent a religious conversion to Islam in foreign lands. Yamaoka Kotaro undertook the Hajj pilgrimage in 1909, guided by the Tatar theologian Abd al-Rashid Ibrahim. Ariga Bunpachiro engaged in academic study of Islam in India. The Japanese Ministry of Justice engaged in a process of study and adaptation of the legal norms of Islamic states, a reflection of a combination of cultural and strategic interests.

1.3.2. Institutionalization and strategic use (1930–1945)

During the 1930s, the systematic academic study of Islam and the establishment of an institutional framework for Muslim communities in Japan began to take shape. The first Islamic institutions and mosques were established in Japan during this time. These included the Kobe Mosque (1935), the Islamic Cultural Association (1937), Tokyo Camii, and the Institute for the Study of Muslim Areas (1938). During this period, small Muslim communities emerged, and Japanese individuals such as Mustafa Komura converted to Islam and initiated educational and missionary projects, including translations and publications of religious literature.

Islam in pre-war Japan was regarded not solely as a religious phenomenon, but also as a foreign policy instrument. In the aftermath of their triumphs over Russia and China, Japanese strategists regarded the Muslim territories of Central and West Asia as pivotal to the execution of their Pan-Asianism policy. Consequently, organizations such as the Great Japanese Muslim League and the Institute of Islamic Studies emerged, emphasizing the importance of Islam as a strategic, ideological, and cultural tool [6].

1.4. The number and community of Muslims in Japan.

Noda Shōtarō (1891) is traditionally considered the first Japanese Muslim. Among the early converts were Yamada Torajirō and Ariga Buntarō, who laid the foundation for the Japanese Muslim community.

Before World War II, the Muslim population remained small. It was about 1,000 people. They mainly lived in port cities. These cities included Kobe and Yokohama. There has been steady growth since the post-war period: from 3,500 people in 1969 to 70,000 in 2006. By 2010, there were approximately 100,000 foreign Muslims and 10,000 Japanese Muslims in Japan. As of 2024, the total number of Muslims in Japan is estimated to be around 350,000, with the most significant increase observed among citizens of Indonesia, Pakistan, Bangladesh, Afghanistan, and Uzbekistan [7].

1.5. Postwar and Contemporary Stages of Islam's Development in Japan (1945–Present)

In the aftermath of World War II, Japan experienced a diminution of its political and military influence in Central Asia and the Muslim world. Diplomatic contact with Muslims in the former USSR and China remained limited until the early 1990s. The terms «Kaikyō» and «Kaikyōto», previously associated with imperial policy, disappeared in postwar Japan, while the term «Middle East», borrowed from the Western tradition, entered scientific and diplomatic usage.

Starting in the 1950s, academic and public organizations dedicated to studying the Islamic world began forming, including the Japanese Institute of the Middle East (1956), the Japan-Arab Association (1958), and the Association for Islamic Studies (1963). Their activities were linked to nationalist intellectual movements. They were also linked to oil diplomacy. Their activities were linked to cultural exchange.

The International Muslim Association in Tokyo (1952–1960) played a special role in spreading knowledge about Islam. The objectives of this initiative are as follows:

- The primary objective is to disseminate knowledge regarding Islam within the Japanese populace.
- The organization of cultural and educational exchanges with Islamic countries is of paramount importance.
- Providing assistance and fostering collaboration with Muslim communities.

The Japanese religious landscape has been characterized by syncretism, a term denoting the combination of elements from multiple religious traditions. Many Japanese have combined elements of Shintoism, Buddhism, and Christianity, among other religions. Religion was not a fundamental element of identity, and the Constitution enshrined the principle of freedom of religion. According to a survey conducted by NHK in 2018, 62% of Japanese individuals do not identify with any religion, 31% are Buddhists, 3% are Shintoists, 1% are Christians, and 1% are followers of other beliefs [8].

The 1973 oil crisis signified a pivotal juncture in Japanese politics and culture. The economic dependence on oil imported from the Middle East has been demonstrated to strengthen political, cultural, and educational ties. Concomitantly, a proliferation of Islamic centers, hospitals, and organizations providing services to the Muslim community was observed. The 1970s and 1980s witnessed the establishment of an autonomous academic discipline known as Islamic studies. Concurrent with this expansion was the establishment of various academic departments and research centers, which further contributed to the dissemination and study of Arabic and Islamic societies. Japanese scholars transitioned from a practice of indirect research through Western sources to a direct analysis of Islamic texts and the study of Muslim countries based on primary sources. Since the late 1970s, the Islamic community in Japan has undergone substantial development. A notable influx of laborers from Iran, Pakistan, Bangladesh, and other nations has been observed, coinciding with a period of significant economic growth and a consequent demand for labor. A significant number of migrants remained in the region for extended periods, thereby contributing to the expansion of the Muslim demographic.

Intercultural marriages also played a significant role: Conversely, Japanese women who embraced Islam became integrated into Muslim families, thereby establishing a second generation of adherents. The infrastructure necessary for the facilitation of religious practices is being developed. There has been an emergence of mosques, prayer rooms (*musalla*), and Islamic cemeteries, indicating a gradual establishment of Islam within Japanese society. In the 21st century, Japan has witnessed a persistent increase in its Muslim population, attributable to various factors, including migration patterns, interfaith unions, and domestic converts. The number of mosques has increased to more than 130, especially in major metropolitan areas such as Tokyo, Kyoto, Nagoya, Osaka, and Hiroshima. Mosques are undergoing a transformation into centers for *da'wah* and cultural exchange. Islam, therefore, finds itself integrated into the urban landscape through these and other channels. The evolution of the Halal industry is characterized by the emergence of various commercial entities, including restaurants, food certification bodies, and specialized prayer facilities. These developments are indicative

of the industry's expansion and the diversification of its offerings. The institution offers educational programs for two distinct age groups: children and adults. The following initiatives and projects are of a cultural nature and are intended for the benefit of the community:

Despite their quantitative growth, Muslims remain a small minority (~1% of the population), and their presence is largely «invisible» to the general public. Concurrently, prominent imams and notable figures of Japanese origin are coming to the fore, playing a pivotal role in the adaptation of Islam to the local context. The predominant regions of residence for foreign Muslims are substantial, urbanized prefectures. Tokyo, Aichi, Osaka, and Kanagawa [9]. At the conclusion of the year 2020, the number of Muslims hailing from the ten leading countries of origin totaled 118,000, with the aggregate number of Muslims exceeding 200,000. Islamic communities and infrastructure are undergoing active development, including the construction of mosques, prayer rooms, cultural centers, and educational programs. These institutions play a pivotal role in facilitating the integration of Muslims into Japanese society and contributing to the establishment of a stable local religious environment.

1.6. Interaction between Islamic and Japanese cultures

Islam in Japan continues to be perceived as a «foreign» religion. The practice of religious rituals has given rise to questions among the local population, including those related to the construction of mosques, Islamic education, and Japanese women wearing hijabs at work [10].

Concurrently, researchers have identified common ethical values: A notable point of convergence between Islamic moral principles and Japanese collective ethics, self-discipline, and respect for social order can be identified. This facilitates the cultural adaptation of Muslims and renders Islam comprehensible on a moral and behavioural level, despite the fact that, from a dogmatic perspective, the religion remains alien.

2. Prospects

Despite its relatively slow pace of expansion, Islam in Japan is developing steadily. The establishment of stable Muslim communities is contingent upon the existence of a conducive environment, characterised by state support, legal guarantees of freedom of religion and societal openness. The expansion of the halal sector and the growth of Islamic tourism have given rise to new opportunities in various sectors, including the economy, education, and intercultural dialogue. Since 2001, perceptions of Islam in Japan have evolved. The events of 9/11, the Islamic Revolution in Iran, the collapse of the Soviet Union, and the rise of global religious identity have collectively resulted in a pervasive association of «the Middle East = Islam» in the popular consciousness. The influence of this paradigm shift has been profound, extending to both academic research and government policy. It has catalysed renewed interest in the Islamic world as an independent object of Japan's foreign and cultural policy.

3. Attempts to form «Japanese Islam»

An intriguing phenomenon is the endeavour of Japanese Muslims to adapt

Islam to the local cultural context. Even prior to the war, figures such as Yamaoka Kotaro and Arga Fumihiro endeavoured to elucidate Islam to the Japanese populace through the utilisation of familiar religious images, for instance, by identifying Allah with Shinto deities [11]. During the 1980s, the notion of «Japanese Islam» emerged as a concept of cultural synthesis, encompassing a simplified interpretation of Islamic principles and an exploration of commonalities with the Shinto-Buddhist tradition. Despite the lack of universal endorsement, the notion underscores the intrinsic dynamics of the Islamic presence in Japan – encompassing the external perceptions, cultural adaptations, and reinterpretations that characterised its development [12].

4. The present state of Muslims in Japan is as follows:

According to data collected in 2010, the population of Muslim individuals in Japan was approximately 185,000, constituting 0.1% of the country's total population. Of these Muslims, approximately 10,000 had Japanese ancestry. This «minority within a minority» is distinguished by a commitment to rigorously adhere to Islamic principles. A particularly noteworthy trend has emerged among young people, characterized by a resurgence of traditional practices. This inclination encompasses the adoption of traditional clothing and the adherence to stringent ritual forms. Concurrently, Islam persists in maintaining a tenuous foothold within the public consciousness. A comparison of Japanese and Islamic religiosity reveals notable contrasts. Japanese religiosity is characterized by pragmatism, an orientation toward earthly goods, and the absence of rigid institutional forms. In contrast, Islamic universalism and normative strictness are marked by a different set of values and practices. Nevertheless, it is precisely these differences that engender a unique space for cultural dialogue, where Islam in Japan is developing as a specific phenomenon – not fully integrated, but also not completely isolated from society. The findings of the study indicate that the development of Islam in Japan has undergone a series of historically contingent phases, which are inextricably linked to a multifaceted array of political, cultural, and demographic elements.

a. The historical and cultural particularities of the perception of Islam in Japanese society.

Islam is perceived as a «foreign» religion, partly due to the late arrival of Muslims in the country (Meiji era) and limited knowledge about the religion. This hesitancy can be attributed, at least in part, to the influence of media portrayals and historical stereotypes, which have contributed to the establishment of a wary and somewhat fearful attitude among the Japanese population towards Muslims. Concurrently, the processes of globalization and migration have contributed to the gradual formation of real contact with Islamic culture.

b. The formation of Muslim communities experienced two distinct phases: the pre-war and the post-war.

The period preceding World War II (1900–1945) was characterized by two distinct phases: preparation and institutionalization. This period saw the inception of scholarly inquiry into Islamic nations, the establishment of inaugural mosques and organizations, and the involvement of Japanese individuals in the Hajj and edu-

cational initiatives. In the post-war period (1945–1970), interest in Islamic studies was confined to scientific and cultural initiatives. However, with the establishment of the International Muslim Association and the Japanese Institute of the Middle East, the systematic dissemination of knowledge about Islam commenced.

c. The following paper will examine the impact of economic and migratory factors on the development of Muslim communities.

The 1973 oil crisis led to the expansion of economic and cultural ties with Muslim countries. The phenomenon of mass labor migration from the Middle East and South Asia, as well as intercultural marriages, contributed to the substantial growth of the Muslim population. This population shift has resulted in the formation of a second generation of Muslim believers and the subsequent strengthening of religious infrastructure, such as mosques, prayer rooms, and Islamic cemeteries.

d. The contemporary institutionalization of Islam.

In the 21st century, Islam in Japan has evolved into a stable social and cultural phenomenon. The Muslim population in the region has surpassed 200,000 individuals, and there are currently more than 130 mosques and cultural centers in operation. The halal industry and educational and cultural programs are undergoing development, which contributes to the integration of Muslims into Japanese society, although religion remains relatively inconspicuous to the general public.

e. The issue of regional distribution, in conjunction with an analysis of social structure, is of particular pertinence in this study.

The majority of the Muslim population is concentrated in major metropolitan areas, including Tokyo, Osaka, Kyoto, Nagoya, and Hiroshima. Muslims constitute a diminutive percentage of the population, approximately 1%, yet they have established a resilient local infrastructure and have maintained cultural and religious traditions. The historical trajectory of Islam in Japan is characterized by a multifaceted progression, commencing with sporadic interactions in the 19th century and culminating in the establishment of resilient Muslim communities in the 21st century. The historical interaction between the Islamic world and Japanese society evolved in close correlation with foreign policy strategies, economic interests, and domestic social changes. The contemporary Muslim presence in Japan is an integral part of the nation's cultural and demographic landscape. Additionally, it remains an object of active scholarly interest [13].

Conclusion. The history of Islam in Japan is a complex and multi-layered process reflecting the interaction of foreign policy, cultural, and socio-demographic factors. The initial interaction between Japanese society and the Islamic world occurred during the Meiji era, marking a comparatively recent historical development. Prior to the war, diplomatic relations between Japan and Muslim communities were established, fostering economic exchanges and interactions. Notably, the first Japanese individuals to convert to Islam played a pivotal role in the establishment of modest Muslim communities within Japan. Japan's pre-war policy utilized Islam for strategic purposes, including as part of the ideology of Pan-Asianism and the country's foreign policy interests. Following the cessation of hostilities, the interest in the Islamic world underwent a profound transformation.

The impetus for this transformation stemmed from economic and cultural factors. The activities of the International Muslim Association and other religious and cultural organizations contributed to the dissemination of knowledge about Islam, the development of educational programs, and the strengthening of Muslim communities. The 1973 oil crisis and economic migration from the Middle East and South Asia served as catalysts for the growth of the Muslim population, the formation of an infrastructure of mosques and prayer houses, and the development of the halal industry. The present stage of Japanese Islam is marked by its institutionalization, the expansion of its demographic, which includes both foreign and Japanese Muslims and an increase in educational and cultural initiatives. Furthermore, religion is becoming more integrated into urban and social contexts. Despite quantitative growth and integration, Islam remains largely an «external» phenomenon for Japanese society, requiring ongoing cultural dialogue and adaptation. A comprehensive analysis that incorporates historical, religious, socio-demographic, and cultural factors facilitates a nuanced understanding of the formation of Muslim communities in Japan, the evolution of Islamic perception, and its contemporary role within Japanese society. Islam in Japan is not merely a religious phenomenon; it also serves as an indicator of globalization processes, migration flows, and cultural integration in a modern, multi-ethnic society.

References

- 1 Muslim scholars in Japan: contemplating Islam in a non-muslim society. // <https://traversingtradition.com/2022/11/21/muslim-scholars-in-japan-contemplating-islam-in-a-non-muslim-society/>.
- 2 Islam in Japan: From Confinement to Muslim-Friendly, December 2024. Journal of Al-Tamaddun 19(2):89-100. vol 19 no 2.6. Fikri Surya Pratama.
- 3 Okawa S. Kaikyo gairon. – Tokyo, 1943.
- 4 John L. Esposito (2000). Political Islam and the West, Spring 2000 / JFQ.
- 5 Keiko Sakurai. Japanese Muslim Society Nihon no Musume Shakai, Chikuma Shobo, 2003.
- 6 Shimada, Daisuke 島田大輔 (2015). “Shōwa senzenki ni okeru kaikyō seisaku ni kansuru kōsatsu - Dai Nippon Kaikyō Kyōkai o chūshin ni.” 昭和戦前期における回教政策に関する考察 : 大日本回教協会を中心に [Consideration of the Islamic Policy in Wartime Japan: Focus on the Dai Nippon Kaikyo Kyokai]. Isshinkyō Sekai (March), pp. 64–86.
- 7 Japan Sees Growing Number of Mosques and Muslims, Nihon Keizai Shinbun (Tokyo), October 6, 2008.
- 8 How Have Japanese Attitudes and Behavior on Religion Changed? // <https://www.nhk.or.jp/bunken/d/en/research/yoron/BUNA0000110690040003/>
- 9 Japan's Muslim-Friendly Tourism. // <https://www.japan.travel/en/my/muslim-guide/travel-ideas/japans-muslim-friendly-tourism-what-travelers-need-to-know/>.
- 10 Muhammad Ilyan Faris, Ananda Ilham Ramadhan, Athaillah Arkan Triwahyu. Islam in Japan: When an Unstoppable Force Meet an Immovable Object. Jurnal Transformasi Global Vol. 11 No. 1 [2024].
- 11 Taqiyyuddin, Hirofumi Oki and Adil Abu (1998). Umar Mitsutaro Yamaoka (1880-1959): A Study of His Thought and Contributions to Da'wah. Kulliyah of Islamic Revealed Knowledge

and Human Sciences, International Islamic University Malaysia.

12 *Oleksandra Bibik*. The Concept of «Japanese Islam» in Tanaka Ippei's The Journey of the Wandering White Cloud Diary. *Journal of Religion in Japan*. August 2025.

13 *Muhammad Ilyan Faris, Ananda Ilham Ramadhan, Athaillah Arkan Triwahyu*. Islam in Japan: When an Unstoppable Force Meet an Immovable Object. *Jurnal Transformasi Global* Vol. 11 No. 1 [2024].

Ақын Б.Қ.¹, Абдуразакова К.Ю.²

¹Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан

²Әлішер Навои атындағы Ташкент мемлекеттік өзбек тілі және әдебиеті университеті, Ташкент қ., Өзбекстан

ЖАПОНИЯДАҒЫ ИСЛАМНЫҢ ПАЙДА БОЛУЫ ЖӘНЕ ДАМУ ТАРИХЫ

Түйіндеме. Бұл мақала әлемдік діннің діни біртектілік пен мәдени өзін-өзі қамтамасыз ету дәстүрі бар қоғаммен өзара әрекеттесуінің бірегей мысалы ретінде Жапонияда исламның таралуына тарихи және заманауи талдауға арналған. Жұмыста 19 ғасырдағы алғашқы сауда және дипломатиялық байланыстардан бастап, 21 ғасырдағы тұрақты мұсылман қауымдарының қалыптасуына дейінгі исламның елге ену кезеңдері қарастырылады. Жапон мемлекетінің әртүрлі тарихи кезеңдердегі ислам өлеміне қатысты оқшаулану (сакоку) және Мэйдзи қалпына келтіру дәуірінен 20-шы ғасырдың соңы мен 21-ші ғасырдың басындағы жаһандану процестеріне дейінгі кезеңдегі саясатына ерекше назар аударылады. Исламдық ұйымдардың қызметі, трансұлттық байланыстар, демографиялық өзгерістер, жапон қоғамындағы ислам туралы нақты түсініктер талданады. Зерттеу Жапониядағы исламның дамуы діннің белгілі бір әлеуметтік-мәдени және саяси контекстке бейімделуінің күрделі процесін білдіретінін және елдің сыртқы саясаты мен мәдени стратегияларының трансформациясын көрсететінін көрсетеді.

Түйінді сөздер: Жапония, Ислам, діни азшылықтар, Мұсылман қауымдары, Ислам тарихы.

Ақын Б.К.¹, Абдуразакова К.Ю.²

¹ҚазНУ имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Ташкентский государственный университет узбекского языка и литературы имени Алишера Навои, г. Ташкент, Узбекистан

ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ИСЛАМА В ЯПОНИИ

Аннотация. Статья посвящена историческому и современному анализу распространения ислама в Японии как уникальному примеру взаимодействия мировой религии с обществом, обладающим длительной традицией религиозной гомогенности и культурной самодостаточности. В работе рассматриваются этапы проникновения ислама в страну — от первых торгово-дипломатических контактов XIX века до формирования устойчивых мусульманских общин в XXI веке. Особое внимание уделяется политике японского государства в отношении исламского мира в различные исторические периоды: от эпохи изоляции (сакоку) и Реставрации Мэйдзи до глобализационных процессов конца XX — начала XXI веков. Анализируется деятельность исламских организаций, транс-национальные связи, демографические изменения и особенности восприятия ислама

в японском обществе. Исследование демонстрирует, что развитие ислама в Японии представляет собой сложный процесс адаптации религии в специфическом социокультурном и политическом контексте и отражает трансформацию внешнеполитических и культурных стратегий страны.

Ключевые слова: Япония, ислам, религиозные меньшинства, мусульманские общины, история ислама.

Information about the authors

Akyn Bakdaulet Kaliakhmetuly – PhD, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty c., Kazakhstan, aqbaqd@gmail.com

Contributions: Study design, research, results analysis, publication preparation.

Abdurazakova Kamolakhon Yusupovna – PhD, Tashkent State University of the Uzbek Language and Literature named after Alisher Navoi, Tashkent c., Uzbekistan, kamola.abdurazakova@gmail.com

Contributions: Research, discussion.

Авторлар туралы мәліметтер

Ақын Бақдаулет Қалиахметұлы – PhD, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан, aqbaqd@gmail.com

Жұмысқа қосқан үлесі: Зерттеуді жобалау, зерттеу жүргізу, нәтижелерді талдау, жариялауды дайындау.

Абдуразакова Камолахан Юсуповна – PhD, Әлішер Навои атындағы Ташкент мемлекеттік өзбек тілі және әдебиеті университеті, Ташкент қ., Өзбекстан, kamola.abdurazakova@gmail.com

Жұмысқа қосқан үлесі: зерттеу, талқылау.

Сведения об авторах

Ақын Бақдаулет Қалиахметұлы – PhD, КазНУ имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, aqbaqd@gmail.com

Вклад в работу: дизайн исследования, проведение исследований, анализ результатов, подготовка публикации.

Абдуразакова Камолахан Юсуповна – PhD, Ташкентский государственный университет узбекского языка и литературы имени Алишера Навои, г. Ташкент, Узбекистан, kamola.abdurazakova@gmail.com

Вклад в работу: исследование, обсуждение.

ШАБЛОН НАПИСАНИЯ СТАТЬИ

ҚОЛЖАЗБАНЫ РӘСІМДЕУ ТАЛАПТАРЫ

Эксперименттік мақаланың көлемі – 7-ден 15 бетке дейін (А4 форматы), 4-6 сурет (кесте); үш тілдегі түйіндемелерді, кестелерді, суреттерді, Әдебиеттер тізімін, Әдебиеттер тізімінің сілтемелерін, Авторлар туралы мәліметтерді есептемегенде.

Шолу мақаласы – 7-15 бет, оның ішінде түйіндеме, кестелер, суреттер, әдебиеттер тізімі, әдебиеттер тізімінің сілтемелері, суреттер немесе кестелер саны 9-дан аспайды (3 сурет 1 бетке есептеледі); үш тілдегі авторлар туралы мәліметтер.

Қысқаша хабарлама – түйіндемелерді, кестелерді, суреттерді, әдебиеттер тізімін, әдебиеттер тізімінің сілтемелерін, үш тілдегі авторлар туралы мәліметтерді қоспағанда, суреттерді немесе кестелерді (үштен аспайтын) қоса алғанда 5-9 бет.

Мәтіндік файлдарды PDF және Word форматында (6.0 және одан кейінгі нұсқалары), қаріп – Times New Roman, өлшемі – 12pt, 1,15 интервалмен, бір бағанда ұсыну керек.

МАКАЛА ЖАЗУ ҮЛГІСІ

ҒТАМА коды (Ғылыми-техникалық ақпараттың мемлекетаралық айдары)

Авторлардың тегі мен аты-жөні – 3 тілде (қазақ, орыс, ағылшын) (біріншісі – мәтіннің авторы, содан кейін бірлескен авторлар мен ғылыми жетекшілер);

Мекеменің атауы, қаласы, елі – 3 тілде (қазақ, орыс, ағылшын);

Егер мақаланың авторлары әртүрлі мекемелерден болса, онда әр фамилияның соңына жоғарғы жағына сан қойыңыз. Әр автордың жұмыс орнын көрсетіңіз және тиісті автордың жұмыс орны атауының басына үстіңгі санды қойыңыз.

Мысал: *А.К. Бериков¹, С.И. Васильев²*

¹Тау-кен ісі институты, Алматы қ., Қазақстан

²Академик Ө. Асаналиев атындағы Қырғыз тау-кен металлургиялық институты, Бішкек қ., Қырғызстан

Мақаланың тақырыбы – 3 тілде (қазақ, орыс, ағылшын);

– барынша қысқа, ақпараттық, қысқартусыз болуы тиіс;

Түйіндеме: 3 тілде жазылады (орыс, қазақ, ағылшын);

150-200 сөзден аспауы тиіс. (Түйіндеме мазмұны: Зерттеу мақсаты. Не

істелді. Не табылды. Нәтижелері несімен маңызды, қолдану аясы, әлемде аналогтары бар ма);

Түйінді сөздер: 3 тілде (қазақ, орыс, ағылшын) жазылады – барлығы 5-6 жалғыз сөз және екі-үш сөз тіркесінен аспайды;

Мақала мәтіні: кестелер, суреттер, келтірілген әдебиеттер тізімі;

Кіріспе – соңғы онжылдықтарда осыған ұқсас немесе оған жақын зерттеулер жүргізілген отандық және шетелдік жұмыстарды міндетті түрде қарастырылған мәселенің тарихының қысқаша мазмұны.

Зерттеудің мақсаты – қысқаша сипаттама.

Зерттеу әдістері – жаңа әдістерді егжей-тегжейлі сипаттау керек; авторды және/немесе әдістің атауын көрсете отырып, әдебиеттер тізімінде бұрын жарияланған және белгілі әдістерге сілтеме жасау жеткілікті.

– **Кестелер** араб цифрларымен нөмірленіп, сипаттамалық атауы болуы керек. Сандық өлшемдер (бірліктер) баған тақырыбына қосылуы керек.

– Тек ең жақсы сападағы **суреттер** (графиктер, формулалар, сызбалар және т.б.) және түрлі-түсті иллюстрациялар басып шығаруға қабылданады. Суреттерде ондағы кескінге нақты сипаттама беретін қысқаша тақырыптар болуы керек. Суреттердің тақырыптары иллюстрацияларға орналастырылмауы керек. Графика түріне қарамастан, сызбалар дюйміне 600 нүктеден төмен емес жоғары ажыратымдылыққа ие болуы керек. Суреттердің максималды мөлшері 120 × 210 мм. Ұсынылған сапасыз графикалық материалдарға редакция жариялау кезінде жауап бермейді.

Зерттеу нәтижелері – негізгі теориялық және эксперименттік нәтижелер, нақты деректер, анықталған қатынастар мен заңдылықтар келтіріледі. Бұл жағдайда жаңа нәтижелерге, маңызды жаңалықтарға, қолданыстағы теорияларды жоққа шығаратын тұжырымдарға, сондай-ақ практикалық маңызы бар мәліметтерге артықшылық беріледі.

Нәтижелерді талқылау – үздік отандық және әлемдік аналогтармен салыстыру жүргізіледі. Зерттеудің пікірталас сәттері және оларды шешуге деген көзқарасыңыз сипатталады.

Қорытынды – жұмыстың қорытындысын шығару, зерттеудің жаңалығы мен өзектілігін негіздеу, алынған нәтижелерді қолдану бойынша ұсыныстар.

Зерттеулерді қаржыландыру көзі – ведомстволар, қорлар, жеке адамдар және т.б. Пайдаланылған әдебиеттер тізімінің алдына қойылуы керек. Қаржыландырушы ұйымдардың атаулары толық жазылуы тиіс.

Алғыс – демеушілерге, ғылыми жетекшілерге, жұмысқа белсенді қатысқан адамдарға және т. б.

Әдебиеттер тізімі – мәтіндегі сілтемелер оларды еске түсіру ретімен өсу бойынша нөмірленеді. Жарияланым туралы библиографиялық мәліметтер 7.1-2003 MEMCT-на сәйкес рәсімделеді. Әдебиеттер тізімін рәсімдеу үлгісі журналдың vestnik.nauka.kz сайтында ұсынылған. Әдебиеттер тізіміне нормативтік құжаттар, статистикалық жинақтар, газеттерден алынған мақалалар **кірмейді**. Олар мәтінде айтылғаннан кейін жақшаға алынады. Интернет-сайттарға сілтемелер 7.5-98 MEMCT-қа сәйкес жүргізіледі.

Өзіне-өзі сілтеме жасау жалпы тізімнің 20-30%-нан аспауы керек. 10-15 жылдан аспайтын, өсіресе қолданбалы сипаттағы мақалаларға арналған әдеби көздер тізімнің едәуір бөлігін құрауы керек.

References – (Әдебиеттер тізімін транслитерациялау) – 7.79-2000 МЕМСТ-қа сәйкес рәсімделеді және редакция талаптарына сәйкес орналас-тырылады.

Авторлар туралы мәліметтер 3 тілде (қазақ, орыс, ағылшын) **жазылады.**

- тегі, аты, әкесінің аты (бар болса), ғылыми атағы/дәрежесі,
- авторлардың әрқайсысының жұмысына қосқан үлесі – эксперимент, деректерді өңдеу, талқылау, қолжазба дайындау, әдебиет іздеу, зерттеу және т. б.
- электрондық пошта.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РУКОПИСИ

Экспериментальная статья — от 7 до 15 страниц (формат А4), 4-6 рисунков (таблиц), не считая аннотации, таблицы, рисунки, Список литературы, References списка литературы, Сведения об авторах на трех языках.

Обзорная статья – 7-15 страниц, включая аннотации, таблицы, рисунки, Список литературы, References списка литературы, количество рисунков или таблиц не более 9 (3 рисунка считаются за 1 страницу); Сведения об авторах на трех языках.

Краткое сообщение – 5-9 страниц, включая рисунки или таблицы (не больше трех), не считая аннотации, таблицы, рисунки, Список литературы, References списка литературы, Сведения об авторах на трех языках.

Текстовые файлы следует представлять в формате PDF и Word (версии 6.0 и более поздние), шрифт — Times New Roman, размер — 12pt, Интервал - 1,15, в одну колонку.

ШАБЛОН НАПИСАНИЯ СТАТЬИ

код МРНТИ (Межгосударственный рубрикатор научно-технической информации)

Фамилия и инициалы авторов – на 3-х языках (казахский, русский, английский) (первый — автор текста, затем соавторы и научные руководители);

Наименование места работы, город, страна – на 3-х языках (казахский, русский, английский);

Если авторы статьи из разных учреждений, то в конце каждой фамилии поставить надстрочную цифру, соответствующую месту работы. Ниже указать место работы каждого автора и поставить надстрочную цифру в начале наименования места работы.

Пример:

Бериков А.К.¹, Васильев С.И.²

¹Институт горного дела, г. Алматы, Казахстан

² Кыргызский горно-металлургический институт им. Академика

У. Асаналиева,

г. Бишкек, Кыргызстан

Заглавие статьи – на 3-х языках (казахский, русский, английский);
- должно быть максимально кратким, информативным, без сокращений;

Аннотация: пишется на 3-х языках (русский, казахский, английский):

Не более **150-250 слов**. (Содержание аннотации: Цель исследований. Что сделано. Что обнаружено. Чем важны результаты, Область применения, Есть ли аналоги в мире);

Ключевые слова: пишутся на 3-х языках (казахский, русский, английский) — всего 5-6 одиночных слова и не более двух-трёх словосочетаний;

Текст статьи: включает таблицы, рисунки, список цитированной литературы;

Введение — краткое изложение истории вопроса с рассмотрением отечественных и зарубежных работ, в которых аналогичные или близкие исследования уже проводились за последние десятилетия;

Цель исследования — краткое описание;

Методы исследования — следует детально описывать новые методы; на ранее опубликованные и общеизвестные методы достаточно сослаться в списке литературы, указав автора и/или название метода;

– **Таблицы** должны быть пронумерованы арабскими цифрами и иметь описательное название. Численные измерения (единицы) должны быть включены в заголовок столбца.

– **Рисунки** (графики, чертежи и пр.) и цветные иллюстрации принимаются к печати, только в лучшем качестве. Рисунки должны иметь краткие заголовки, дающие точное описание к изображению на рисунках. Заголовки рисунков не должны размещаться на иллюстрациях. Независимо от типа графики, рисунки должны обладать высоким разрешением, не ниже 600 точек на дюйм. Максимальный размер рисунков 120 × 210 мм. За предоставленные не качественные графические материалы, при публикации редакция ответственности не несёт.

Результаты исследования — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, имеющим практическое значение.

Обсуждение результатов — производится сопоставление с лучшими отечественными и мировыми аналогами. Описываются дискуссионные моменты исследования, и ваше видение их разрешения.

Вывод — подведение итогов работы, обоснование новизны и актуальности исследования, рекомендации по применению полученных результатов.

Источник финансирования исследований — ведомства, фонды, отдельные люди и т.д. должны быть помещены перед списком использованной

литературы. Наименования финансирующих организаций должны быть написаны полностью.

Благодарность – выражается благодарностью спонсорам, научным руководителям, лицам, принимавшим деятельное участие в работе и пр.

Список литературы — ссылки в тексте нумеруются по возрастанию в порядке их упоминания. Библиографические сведения о публикации оформляются согласно ГОСТ 7.1-2003. В список литературы **не включаются** нормативные документы, статистические сборники, статьи из газет, так как их оформляют в круглые скобки после упоминания в тексте. Ссылки на интернет-сайты производятся согласно ГОСТ 7.5-98, предпочтение отдаётся электронным журналам.

Самоцитирование не должно превышать 20-30% от общего списка. Литературные источники давностью не более 10-15 лет должны составлять значительную часть списка, особенно для статей прикладного характера.

References – (Транслитерация Списка литературы) — оформляется согласно ГОСТ 7.79-2000 и размещается в соответствии с требованиями редакции.

Сведения об авторах на 3-х языках (казахский, русский, английский):

- фамилия, имя и отчество полностью (если есть),
- научная степень/звание,
- место работы автора
- вклад в работу каждого из авторов – Эксперимент, Обработка Данных, Обсуждение, Подготовка Рукописи, Поиск Литературы, Исследования и пр.
- электронная почта.

Регистрационное свидетельство
№ 1332 от 07.06.1994г.
выдано Министерством печати
и массовой информации
Республики Казахстан

Главный редактор *Болезенова С.А.*
Редактор *Л.Н. Гребцова*
Ответственный секретарь *Е.С. Сухова*
Обложка *Гребцова Л.Н., Е.С. Сухова*
Редактор текста на казахском языке *Т.Т. Садырова*
Компьютерная верстка *Д.Р. Турысбек*

Подписано в печать 31.10.2025.
Формат 60х84/16. Печать офсетная. Бумага офсетная.
Усл п. л 6,0. Тираж 350 экз. Заказ 160.

Редакционно-издательский отдел НЦ ГНТЭ.
050026, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Бөгенбай батыра, 221
