

ISSN 1563-0315; eISSN 2663-2276

ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТИ

ХАБАРШЫ

Физика сериясы

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЬ-ФАРАБИ

ВЕСТНИК

Серия физическая

AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

RECENT CONTRIBUTIONS TO PHYSICS

№4 (83)

Алматы
«Қазақ университеті»
2022



KazNU Science · ҚазҰУ Ғылыми · Наука КазНУ

ХАБАРШЫ

ФИЗИКА СЕРИЯСЫ №4 (83) қыркүйек



04.05.2017 ж. Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникация министрлігінде тіркелген

Күзділ № 14498-Ж

Журнал жылына 4 рет жарыққа шығады
(наурыз, маусым, қыркүйек, желтоқсан)

ЖАУАПТЫ ХАТШЫ

Иманбаева А.К., ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)

Телефон: +7(727) 377-33-46

E-mail: physicskaz@gmail.com

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

Давлетов А.Е., ф.-м.ғ.д., профессор – ғылыми редактор (Қазақстан)

Лаврищев О.А., ф.-м.ғ.к. – ғылыми редактордың орынбасары (Қазақстан)

Әбишев М.Е., ф.-м.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Асқарова Ә.С., ф.-м.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Бұртебаев Н., ф.-м.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Алдияров А.Ү., ф.-м.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Жаңабаев З.Ж., ф.-м.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Косов В.Н., ф.-м.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Буфенди Лайфа, профессор (Франция)

Иващук В.Д., ф.-м.ғ.д., профессор (Ресей)

Ишицукэ Эцуо, доктор (Жапония)

Лунарска Элина, профессор (Польша)

Сафарик П., доктор (Чехия)

Тимошенко В.Ю., ф.-м.ғ.д., профессор (Ресей)

Кеведо Эрнандо, профессор (Мексика)

ТЕХНИКАЛЫҚ ХАТШЫ

Дьячков В.В., ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)

Физика сериясы – физика саласындағы іргелі және колданбалы зерттеулер бойынша бірегей ғылыми және шолу мақалаларды жариялайтын ғылыми басылым.



Комитет по обеспечению качества в сфере образования и науки
МОН РК



РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
Science Index



Жоба менеджери

Гульмира Шаккозова

Телефон: +7 701 724 2911

E-mail: Gulmira.Shakkozova@kaznu.kz

Пішімі 60x84/8. Көлемі 7,3 б.т.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің

«Қазақ университеті» баспа үйі.

050040, Алматы қаласы, әл-Фараби даңғылы, 71.

«Қазақ университеті» баспа үйінің баспаханасында
басылды.

Авторлық редакциямен жарыққа шықты

© Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, 2022

1-бөлім

**ТЕОРИЯЛЫҚ ФИЗИКА.
ЯДРО ЖӘНЕ ЭЛЕМЕНТАР БӨЛШЕКТЕР
ФИЗИКАСЫ. АСТРОФИЗИКА**

Section 1

**THEORETICAL PHYSICS
NUCLEAR AND ELEMENTARY PARTICLE
PHYSICS. ASTROPHYSICS**

Раздел 1

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА
ФИЗИКА ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
АСТРОФИЗИКА**

M.T. Kalambay^{1,2,3*} , A.Zh. Naurzbayeva^{3,2} , A.B. Otebay^{1,2} ,
 A.T. Abdinassilim³ , D. Kuvatova¹ , A.D. Assilkhan^{4,2} , T. Panamarev¹ ,

B.T. Shukirgaliyev^{2,1,3} , P.P. Berczik^{5,6,7} 

¹Fesenkov Astrophysical Institute, Kazakhstan, Almaty

²Energetic Cosmos Laboratory, Nazarbayev University, Kazakhstan, Astana

³Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

⁴Daukeev Almaty University of Power Engineering and Telecommunication, Kazakhstan, Almaty

⁵Astronomisches Rechen-Institut, Zentrum für Astronomie, University of Heidelberg, Germany, Heidelberg

⁶Konkoly Observatory, Research Centre for Astronomy and Earth Sciences,

Eötvös Loránd Research Network (ELKH), MTA Centre of Excellence, Hungary, Budapest

⁷Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, Kyiv

*e-mail: kalambay@aphi.kz

Mock observations of simulated star cluster on solar orbit

With the advent of the Gaia DR2 catalog, which contains astrometric and photometric parameters for a large number of stars, measured with a high degree of accuracy, data about the cosmos and the Universe, including Star clusters in our Galaxy, are growing. However, when observed, the cluster stars are lost against the background of stars in the dense Galactic field. In addition, observational data alone is not sufficient to study real clusters from birth to destruction. In this regard, a number of numerical simulations of star clusters have been running to explain the processes and to determine the membership of cluster stars. And for this, we need to conduct a mock observation of model clusters. In this paper, we performed analyses on the output data from numerical simulations and developed a method for conducting mock observations of model clusters.

We took one model of a star cluster with an age of 350 Myr, with a mass of $6000 M_{\odot}$, and with a star formation efficiency SFE=0.25, and put it in different galactic longitudes and at different distances from the Sun. In conclusion, using this method, we can put a cluster at any point on the celestial sphere, and this in turn allows you to compare with the real observed clusters and evaluate the possibility of detecting physical parameters in them.

Key words: star cluster, galactic coordinates system, equatorial coordinates system, numerical simulations.

М.Т. Қаламбай^{1,2,3}, А.Ж. Наурзбаева^{3,2}, А.Б. Өтебай^{1,2}, А.Т. Әбдінәсілім³, Д. Куватова¹,
 Ә.Д. Әсілхан^{4,2}, Т. Панамарев¹, Б.Т. Шукиргалиев^{2,1,3}, П.П. Беркцик^{5,6,7}.

¹В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Қазақстан, Алматы қ.

²Энергетикалық ғарыш зертханасы, Назарбаев университеті, Қазақстан, Астана қ.

³Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

⁴Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан, Алматы қ.

⁵Астрономиялық есептеу институты, Астрономия орталығы,

Гейдельберг университеті, Германия, Гейдельберг қ.

⁶Конколи обсерваториясы, Астрономия және жер туралы ғылымдарды зерттеу орталығы,

Этвеш Лоранд зерттеу желісі (ELCH), Венгрия, Будапешт қ.

⁷Басты астрономиялық обсерватория, Украина Үлттық ғылым академиясы, Украина, Киев қ.

*email: kalambay@aphi.kz

Күн орбитасындағы сандық модельденген жұлдызды шоғырларды бақылау

Жоғары дәлдікпен өлшенетін, жұлдыздардың үлкен санына арналған астрометриялық және фотометриялық параметрлері бар Gaia DR2 каталогының пайда болуының арқасында, ғарыш пен Ғалам және соның ішінде, біздің Галактикадағы жұлдыз шоғырлар туралы деректер артып келеді. Дегенмен Галактиканың тығыз өрісіндегі жұлдыздар фонының әсерінен бақылау кезінде жұлдыз шоғырлары

жоғалып кетеді. Сонымен қатар нақты кластерлерді туғаннан ыдырағанға дейін зерттеу үшін тек бақылау деректері жеткіліксіз. Осыған байланысты процестерді түсіндіру және жұлдыздардың шоғырға мүшелігін анықтау үшін жұлдыз шоғырларының бірқатар сандық модельдеулөрі жүргізіледі. Ал ол үшін жасалған кластерлерді ойша бақылау жүргізу керек. Бұл мақалада біз сандық модельдеу нәтижелерін талдадық және модельдік кластерлердің аспан сферасында ойша бақылау әдісін әзірледік.

Жасы 350 миллион жыл, массасы $6000 M_{\odot}$ және жұлдыз түзілу тиімділігі SFE=0.25 болатын бір жұлдыз шоғырының үлгісін алып, оны әртүрлі галактикалық бойлықта және Күннен әртүрлі қашықтықта орналастырық. Қорытындылай келе, осы әдісті қолдана отырып, біз кластерді аспан сферасының кез келген нүктесіне орналастыра аламыз және бұл өз кезегінде нақты бақыланатын кластерлермен салыстыруға және олардағы физикалық параметрлерді бағалауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: жұлдызды шоғырлар, галактикалық координаттар жүйесі, экваторлық координаттар жүйесі, сандық модельдеу.

М.Т. Каламбай^{1,2,3}, А.Ж. Наурзбаева^{3,2}, А.Б. Отебай^{1,2}, А.Т. Абдинасилим³, Д. Куватова¹,

А.Д. Асилхан^{4,2}, Т. Панамарев¹, Б.Т. Шукиргалиев^{2,1,3}, П.П. Беркцик^{5,6,7}

¹Астрофизический Институт им. В. Г. Фесенкова, Казахстан, г. Алматы

²Энергетическая космическая лаборатория, Назарбаев университет, Казахстан, г. Астана

³Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

⁴Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Казахстан, г. Алматы

⁵Астрономический вычислительный институт, Центр астрономии,

Гейдельбергский университет, Германия, г. Гейдельберг

⁶Обсерватория Конколи, Исследовательский центр астрономии и наук о Земле,

Исследовательская сеть Этвеша Лоранда (ELCH), Венгрия, г. Будапешт

⁷Главная Астрономическая Обсерватория, Национальная Академия Наук Украины, Украина, г. Киев

*e-mail: kalambay@aphi.kz

Мнимые наблюдения моделируемых звездных скоплений на солнечной орбите

С появлением каталога Gaia DR2, содержащего астрометрические и фотометрические параметры для большого числа звезд, измеренные с высокой степенью точности, данные о космосе и Вселенной растут, в том числе данные о звездных скоплениях в нашей Галактике. Однако при наблюдении звезды скопления теряются на фоне звезд в плотном поле Галактики. Кроме того, одних наблюдательных данных недостаточно для изучения реальных скоплений от рождения до распада. В связи с этим проводится ряд численных симуляций звездных скоплений для объяснения процессов и определения принадлежности звезд скоплению. А для этого нам нужно провести мнимое наблюдение за модельными кластерами. В этой статье мы провели анализ выходных данных численного моделирования и разработали метод проведения мнимых наблюдений модельных скоплений.

Мы взяли одну модель звездного скопления с возрастом 350 млн лет, массой $6000 M_{\odot}$ и эффективностью звездообразования SFE=0.25 и разместили ее на разных галактических долготах и на разных расстояниях от Солнца. В заключение сделан вывод: с помощью этого метода мы можем поставить скопление в любую точку небесной сферы, а это в свою очередь позволяет сравнить с реально наблюдаемыми скоплениями и оценить возможность обнаружения в них физических параметров.

Ключевые слова: звездное скопление, галактическая система координат, экваториальная система координат, численное моделирование.

Introduction

There are a lot of rarefied gas and dust in space, the so-called molecular clouds. Stars appear in such Molecular clouds. And the volume of such gas is very large, and this leads to the formation of stars in groups [1, 2]. The number of such stars in groups reaches from 103 to 107 stars, and they can be considered

peers, since they appear almost at the same time on a relatively galactic time scale. During the formation of stars, there is a response coming from massive stars in the form of ionizing radiation, stellar winds and light pressure can easily destroy an entire molecular cloud [3, 4]. The size and dynamic state of the cluster play an important role, since stars can live in the parent cluster for up to several billion years

depending on it [5]. Also, The secular evolution of star clusters, especially the time of their decay, can vary greatly depending on the cluster mass, density profile and the impact of the galactic tidal field [6, 7, 8, 9].

Along with the development of technology, new methods of exploring the cosmos and the Universe are growing. Analyzing this data, we will get a detailed understanding of star clusters, and this in turn gives a new understanding of the Galaxy and the Universe as a whole. Studying star formation in our Galaxy and in other galaxies leads to knowledge about the evolution of galaxies [10, 11].

Also, when conducting observations, the study of groups of stars is relatively easier than single stars. And in extra galactics it is impossible to observe single stars at all. Due to the fact that the stars in the groups are almost the same age, we are given privileges when determining the ages of the stars of the group. Therefore, the study of the population of star clusters and their age distribution allows us to learn the history of star formation in the vicinity of the Sun and in galaxies [12]. It is very important for us to know the processes in clusters for a correct understanding of observational data, and a wrong understanding can distort information about the universe as a whole.

However, despite the improvement of telescopes, there remain difficulties in observing star clusters, separating stars belonging and not belonging to the cluster, and, consequently, difficulties in studying the structure and determining various parameters of the cluster. To understand the evolution of star clusters, we perform numerical simulations. This significantly reduces the study time from birth to the collapse of one cluster than the study through observation. To do this, we will need to develop a method for observing numerical models of clusters.

In addition, conducting imaginary observations of model clusters makes it possible to evaluate the possibility of detecting so-called tidal structures in actually observed star clusters, which, according to numerical modeling, should be observed in middle-aged clusters evolving in the tidal gravitational field of the Galaxy. Difficulties in detecting these structures are associated with a small number of stars in them, which is why they were lost against the background of stars of a dense galactic field. With the advent of the GAIA DR2 catalog, which provides astrometric and photometric parameters for an unprecedented large number of stars, measured with a high degree of accuracy and homogeneity, the search for tidal tails became possible. The main Gaia DR2 catalog [13] contains five-parameter astrometric solutions (coordinates, proper motions and

parallaxes) for 1,330 million stars, visible stellar magnitudes in the Gaia G photometric band, as well as in the red GRP and blue bands GBP, for 1.380 million stars. Gaia's array of astrometric and, in a number of respects, photometric data is unprecedented in volume and accuracy. In the last 2-3 years, using these data, structures that are presumably tidal tails have been detected in several clusters [14, 15, 16, 17], but this is clearly not enough to confidently confirm the results of numerical modeling and to further study the dynamic evolution of star clusters.

In this paper, methods are discussed and the results of imaginary observations of model clusters are presented. The initial data for numerical simulations are done in the same way as in [18, 19, 20] works, using the Phi-GRAPE code.

Development of instruments for mock observations of star clusters

Our simulation of the dynamics of a stellar cluster is carried out in a Cartesian galactocentric coordinate system. To make a comparison with real star clusters that are located in our Galaxy, the first step is to translate the positions and velocities of the cluster star into spherical galactic and equatorial coordinate systems, while placing the cluster at different points of view and different distances from the Sun.

After running the simulation of the star clusters, we will get the output data (file.dat), which contains information about each star given in Table 1. In addition, the first three lines of each file (snapshot) show the snapshot number, the number of particles (stars) in the cluster and the age of the cluster in NB-units.

We introduce Cartesian galactocentric coordinates of the so-called Local Standard of Rest (LSR) - a point in space that defines the origin of the coordinate system in stellar astronomy.

$$X_{\text{LSR}}=8178 \text{ pc} (+13 \text{ pc}), Y_{\text{LSR}}=0.0 \text{ pc}, Z_{\text{LSR}}=0.0 \text{ pc},$$

$$\begin{aligned} VV_{\text{LSR}} &= 0.0 \text{ km/s}, VY_{\text{LSR}} = 224.737 \text{ km/s}, \\ VZ_{\text{LSR}} &= 0.0 \text{ km/s}. \end{aligned} \quad (1)$$

Coordinates of the Sun relative to LSR:

$$X\odot=0.0 \text{ pc}, Y\odot=0.0 \text{ pc}, Z\odot=20.8 \text{ pc} (+0.3 \text{ pc}),$$

$$\begin{aligned} VV\odot &= 11.10 \text{ km/s}, VY\odot = 12.24 \text{ km/s}, \\ VZ\odot &= 7.25 \text{ km/s}. \end{aligned} \quad (2)$$

Table 1

Designation in the code	Denoted value	Unit of measurement
ind	Name (numbering) of stars	
m	Mass at the moment of a given age	NB
x,y,z	Cartesian coordinates (from the center of the Galaxy)	NB
vx,vy,vz	Cartesian velocities (from the center of the Galaxy)	NB
m0	Initial mass	NB
ZZZ	Metallicity of the star	
t0	The time of the appearance of a star	NB
event	Type of star	
SSE MAss	Star mass	M _{SUN}
SSE Spin	Rotation of the star on its axis	
SSE Rad	Star radius	R _{SUN}
SSE Lum	Star luminosity	L _{SUN}
SSE Temp	Star temperature	Kelvin K
SSE MV	Absolute magnitude	
SSE BV	Color indicator	

To rotate the coordinate system around the Z axis by the required angle (ϕ), we will perform the following operations:

$$\begin{aligned} X_G &= x \cdot \cos\phi + y \cdot \sin\phi, \\ Y_G &= -x \cdot \sin\phi + y \cdot \cos\phi, \\ Z_G &= z, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} VX_G &= vx \cdot \cos\phi + vy \cdot \sin\phi, \\ VY_G &= -vx \cdot \sin\phi + vy \cdot \cos\phi, \\ VZ_G &= vz. \end{aligned} \quad (4)$$

After we can transfer from a galactocentric system to a heliocentric one:

$$\begin{aligned} X_{\star} &= X_G - X_{\odot} - X_{LSR}, \\ Y_{\star} &= Y_G - Y_{\odot} - Y_{LSR}, \\ Z_{\star} &= Z_G - Z_{\odot} - Z_{LSR}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} VX_{\star} &= VX_G - VX_{\odot} - VX_{LSR}, \\ VY_{\star} &= VY_G - VY_{\odot} - VY_{LSR}, \\ VZ_{\star} &= VZ_G - VZ_{\odot} - VZ_{LSR}. \end{aligned}$$

Next, we find the galactic spherical coordinate system, there are distance d, galactic longitude l and galactic latitude b, also the radial velocity V_r, proper motions in l and b – pml and pmb.

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{(X_{\star}^2 + Y_{\star}^2 + Z_{\star}^2)}, \\ l &= \text{atan2}(Y_{\star}, X_{\star}), \\ b &= \text{asin}(Z_{\star}/d), \end{aligned} \quad (6)$$

$$V_r = \cos l \cdot \cos b \cdot VX_{\star} + \cos b \cdot \sin l \cdot VY_{\star} + \sin b \cdot VZ_{\star}.$$

$$pm_l = (-\sin l \cdot VX_{\star} + \cos l \cdot VY_{\star}) / d, \quad (7)$$

$$pm_b = (-\sin b \cdot \cos l \cdot VX_{\star} - \sin l \cdot \sin b \cdot VY_{\star} + \cos b \cdot VZ_{\star}) / d.$$

Thus, we rotate our cluster relative to us by the required angle and find its spherical galactic coordinates. Then, using the Python package [21], we switch to the equatorial coordinate system.

Results

We took one model of a star cluster with an age of 350 Myr, a mass of 6000M_⊕ and a star formation efficiency SFE=0.25. Using our method, we put the cluster models in a certain position relative to the Sun and calculated the spherical coordinates, distances, proper and radial motions of stars in this cluster position. Figure 1-2 show the spatial and velocity distribution of the stars of this cluster in galactocentric Cartesian coordinates. In all N-body simulations that have been launched in the potential of the galaxy, stars appear that refer to tidal tails. It can be seen that the cluster began to collapse, forming at the same time at some distance from the center (220-280 pc) clearly distinguishable tidal structures. Also, the velocities of the tidal tail stars differ from the cluster stars, and thus we can notice them in the velocity distribution too. After that, we put the same model in different places along the galactic longitude and at different heliocentric distances (Table 2).

Table 2

Nº	Galactic longitude (l) [degree]	Heliocentric distances (d) [pc]	Right ascension (α) [degree]	Declination (δ) [degree]	Color on plots
1	270.7°	200 pc	131.5°	-52.7°	blue
2	86.5°	1000 pc	315.7°	45.02°	orange
3	277.02°	2000 pc	145.25°	-53.7°	red

Figures 3-5, for example, show the results of such a study of a model cluster located in the plane of the galactic disk at a different heliocentric distance and at a different galactic longitude. As we can see, the tidal tails, which are very clearly visible in Figures 1-2, are no longer quite noticeable. It may depend on the angle of view. And of course, the further away the cluster is, the smaller it becomes (Figure 5).

Figures 6-8 show diagrams of right ascension - declination and proper motion in right ascension - proper motion in declination for stars of this cluster. After putting the model cluster on the celestial sphere, the appearance of our cluster may change. But still, the heliocentric distance plays a big role in observation.

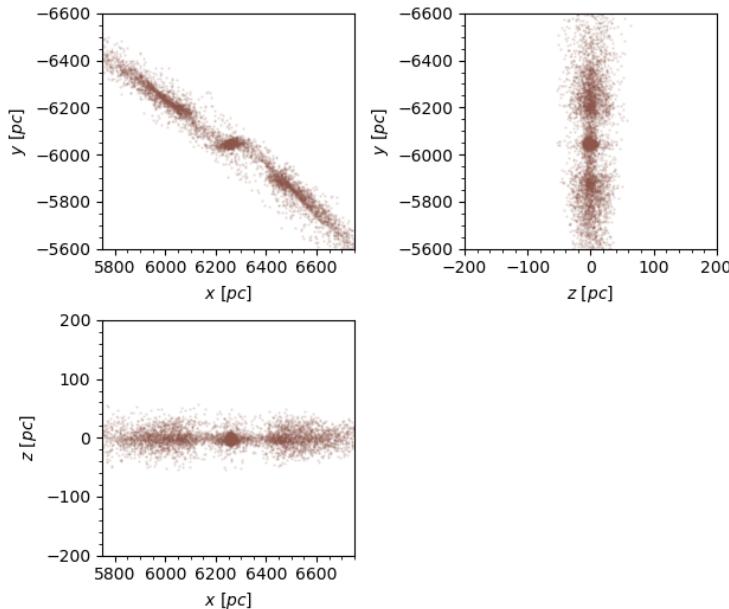


Figure 1 – Spatial distribution of the stars of the model cluster in galactocentric Cartesian coordinates

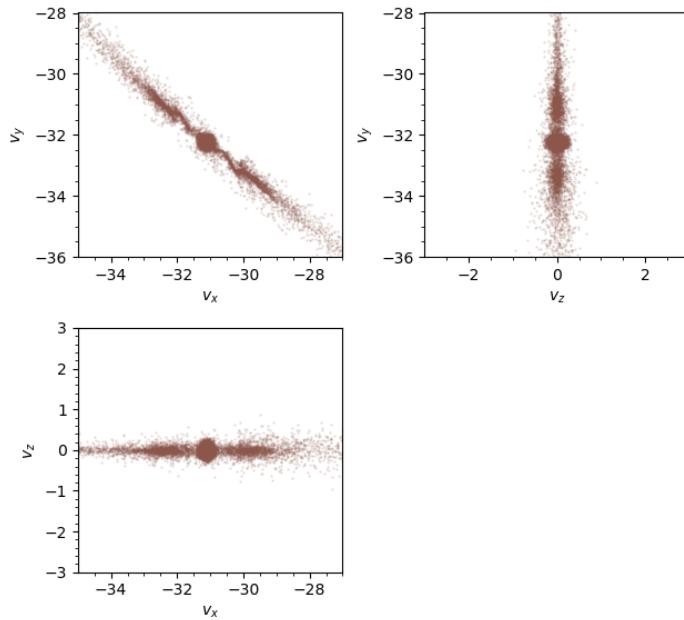


Figure 2 – Velocity distribution of the stars of the model cluster in galactocentric Cartesian coordinates

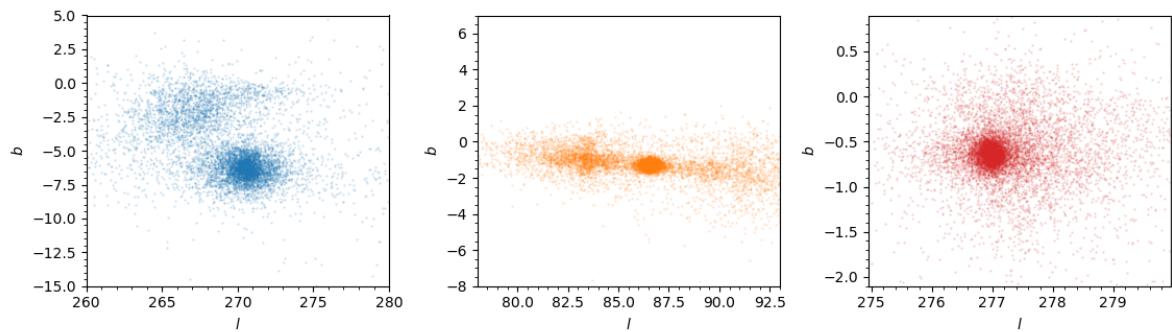


Figure 3 – Galactic latitude l and longitude b diagram of cluster stars

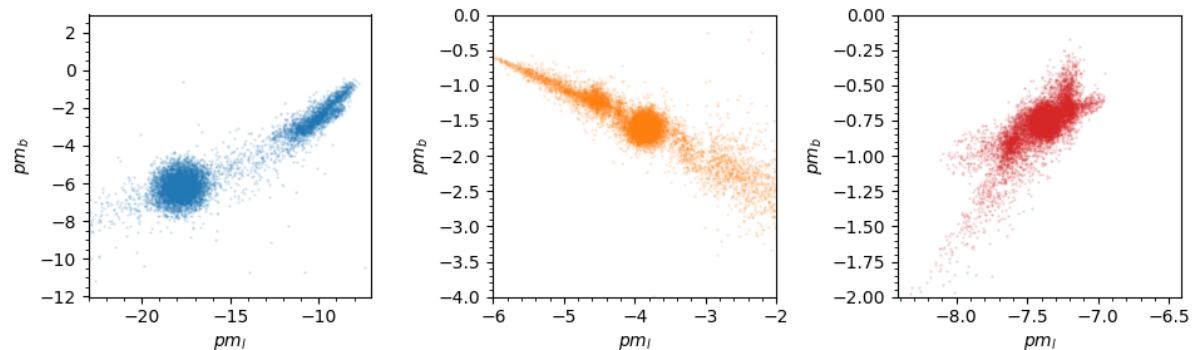


Figure 4 – proper motion by galactic l and longitude b diagram of cluster stars

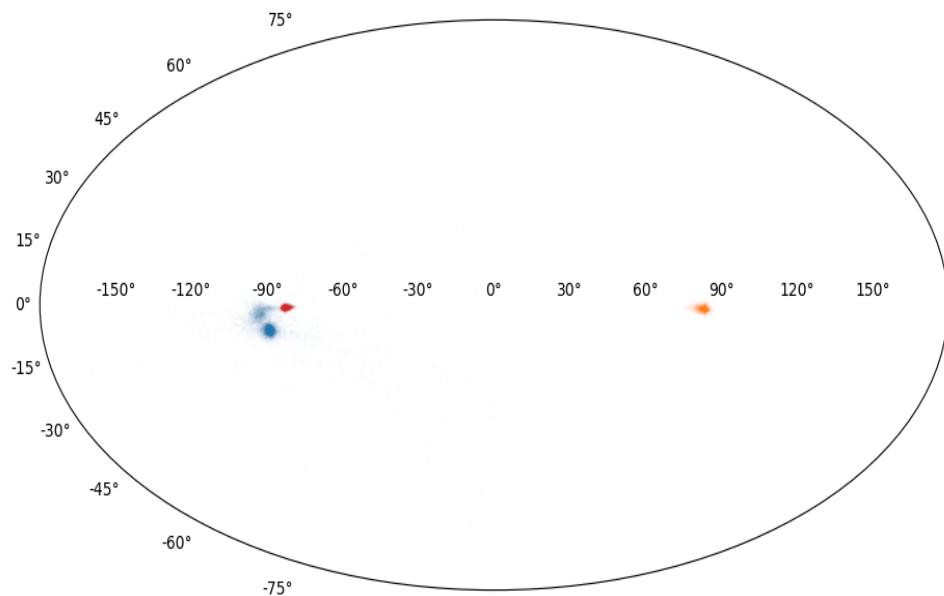


Figure 5 – Galactic latitude l and longitude b diagram of cluster stars

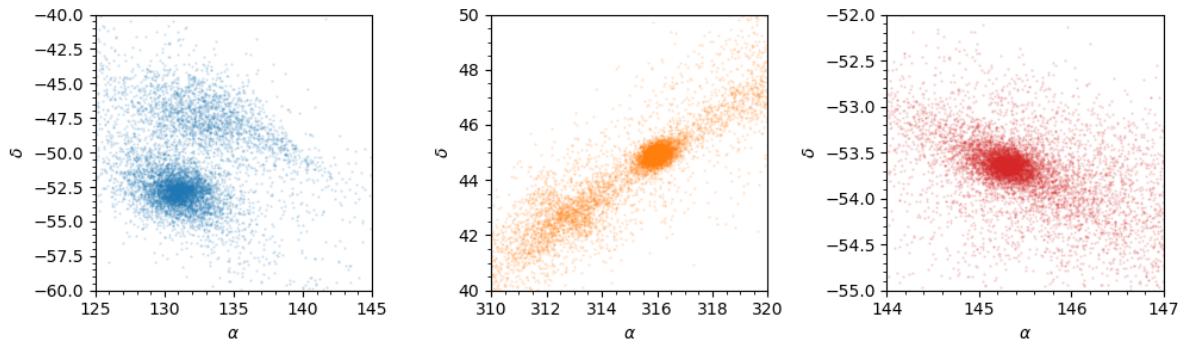


Figure 6 – Right-ascension–declination diagram for the stars

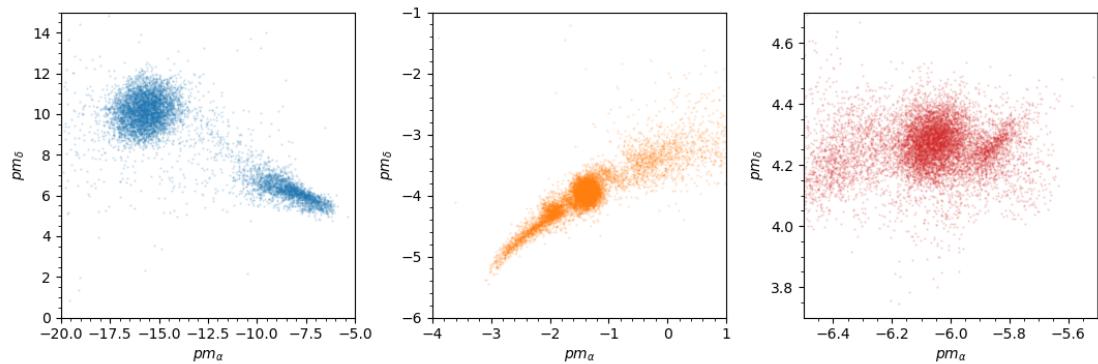


Figure 7 – Diagram of proper motion in right ascension – proper motion in declination for the stars

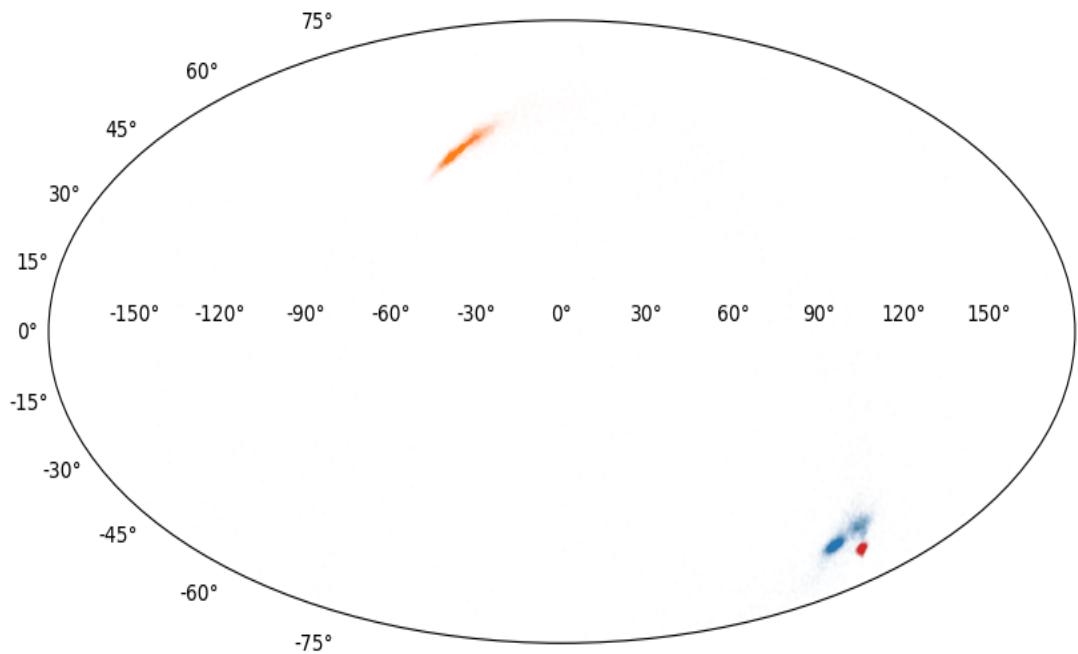


Figure 8 – Right-ascension–declination diagram for the stars

Conclusion

Runs for numerical simulation of star clusters were carried out repeatedly with different initial data. From these runs, one model was chosen with the Age = 350 Myr, mass is 6000M_⊙, and star formation efficiency SFE=0.25. Also, the chosen cluster rotates around the center of the Milky Way galaxy at a distance equal to the Solar distance. The simulation clearly shows that clusters have a tidal tail that starts at a distance from the center with 220 pc. To compare numerical models with real observational data, it is necessary to conduct a mock observation of cluster stars from the simulation. To do this, a code has been developed for putting our cluster on the celestial sphere. The results show that depending on the galactic longitude and distance, a star cluster may have a different shape. Since the same model was placed at different angles and distances from us (but the cluster still remains in its orbit). In addition, particles of one tidal tail are sometimes visible, and the second is not observed, and sometimes it coincides with the angle of vision and is not visible, this confuses observers. However, we can say that by

the proper motion of the stars in the right ascension and declination, that the particles of the tails differ from the main cluster.

Acknowledgments

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No.AP08856184, AP08856149 and AP08052312). This work was partly supported by the International Partnership Program of the Chinese Academy of Sciences, Grant No. 114A11KYSB20170015 (GJHZ1810). MK, BS and TP are grateful for hospitality and support during visits to the Silk Road Project of the National Astronomical Observatories of the Chinese Academy of Sciences. The work of PB was supported by the Volkswagen Foundation under the special stipend No. 9B870 (2022) and the grant No. 97778. PB acknowledges support by the National Academy of Sciences of Ukraine under the Main Astronomical Observatory GPU computing cluster project No.~13.2021.MM.

References

1. Lada, C.J., & Lada, E.A. Embedded Clusters in Molecular Clouds // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2003. – Vol. 41. – P. 57-115.
2. Krumholz, M.R., McKee, C.F., & Bland-Hawthorn, J. Star Clusters Across Cosmic Time // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2019. – Vol. 57. – P. 227-303.
3. Rahner, D., Pellegrini, E.W., Glover, S.C.O., et al. WARPFIELD 2.0: feedback-regulated minimum star formation efficiencies of giant molecular clouds // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2019. – Vol. 483. – P. 2547-2560.
4. McLeod, A.F., Ali, A.A., Chevance, M., Della Bruna, L., Schruba, A., Stevance, H.F., Adamo, A., Kruijssen, J. M.D., Longmore, S.N., Weisz, D.R., et al. The impact of pre-supernova feedback and its dependence on environment // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – Vol. 508. – P. 5425.
5. Madau, P., & Dickinson, M., Cosmic Star-Formation History // Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2014. – Vol. 52. – P. 415-486.
6. Fukushige, T., & Heggie, D.C. Pre-collapse evolution of galactic globular clusters // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1995. – Vol. 276. – P. 206-218.
7. Tanikawa, A., & Fukushige, T. Mass-Loss Timescale of Star Clusters in an External Tidal Field. I. Clusters on Circular Orbits // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2005. – Vol. 57. – P. 155-164.
8. Whitehead, A.J., McMillan, S.L.W., Vesperini, E., & Portegies Zwart, S. Simulating Star Clusters with the AMUSE Software Framework. I. Dependence of Cluster Lifetimes on Model Assumptions and Cluster Dissolution Modes // The Astrophysical Journal. – 2013. – Vol. 778. – P. 118.
9. Ernst, A., Berczik, P., Just, A., & Noel, T. Roche volume filling and the dissolution of open star clusters // Astronomische Nachrichten. – 2015. – Vol. 336. – P. 577-589.
10. Kennicutt, R.C., & Evans, N. J. Star Formation in the Milky Way and Nearby Galaxies. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2012. – Vol. 50. – P. 531-608.
11. Krumholz, M.R., McKee, C.F., & Bland-Hawthorn, J. Star Clusters Across Cosmic Time. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2019. – Vol. 57. – P. 227-303.
12. Chandar, R., Fall, S.M., & Whitmore, B.C. New Tests for Disruption Mechanisms of Star Clusters: The Large and Small Magellanic Clouds. // The Astrophysical Journal. – 2010. – Vol. 711. – P. 1263-1279.
13. Gaia Collaboration, Brown, A.G.A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J.H.J., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A.L., Biermann, M., Evans, D.W., Eyer, L., Jansen, et al. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // Astronomy and Astrophysics. – 2018. – Vol. 616. – P. A1.

14. Tang, S.-Y., Pang, X., Yuan, Z., Chen, W. P., Hong, J., Goldman, B., Just, A., Shukrgaliyev, B., & Lin, C.-C. Discovery of Tidal Tails in Disrupting Open Clusters: Coma Berenices and a Neighbor Stellar Group // *The Astrophysical Journal*. – 2019. – Vol. 877.
15. Röser, S., & Schilbach, E. Praesepe (NGC 2632) and its tidal tails // *Astronomy and Astrophysics*. – 2019. – Vol. 627. – P. A4.
16. Röser, S., Schilbach, E., & Goldman, B. Hyades tidal tails revealed by Gaia DR2 // *Astronomy and Astrophysics*. – 2019. – Vol. 621. – P. L2.
17. Sharma, S., Bland-Hawthorn, J., Johnston, K. V., & Binney, J. Galaxia: A Code to Generate a Synthetic Survey of the Milky Way // *The Astrophysical Journal*. – 2011. – Vol. 730. – P. 3.
18. Shukrgaliyev, B., Parmentier, G., Just, A., et al. The Long-term Evolution of Star Clusters Formed with a Centrally Peaked Star Formation Efficiency Profile // *The Astrophysical Journal*. – 2018. – Vol. 863. – P. 171.
19. Shukrgaliyev, B., Parmentier, G., Berczik, P., & Just, A. The star cluster survivability after gas expulsion is independent of the impact of the Galactic tidal field // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2019. – Vol. 486. – P. 1045-1052.
20. Shukrgaliyev, B., Parmentier, G., Berczik, P., et al. Star Clusters in the Galactic tidal field, from birth to dissolution // *Star Clusters: From the Milky Way to the Early Universe*. – 2020. – Vol. 351. – P. 507-511.
21. Astropy Collaboration, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., Greenfield, P., Droettboom, M., Bray, E., Aldcroft, T., Davis, M., Ginsburg, A., Price-Whelan, A. M., Kerzendorf, et al. Astropy: A community Python package for astronomy // *Astronomy and Astrophysics*. – 2013. – Vol. 558. – P. A33.

References

- 1 C.J. Lada & E.A. Lada, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 41, 57-115 (2003).
- 2 M.R. Krumholz, C.F. McKee, & J. Bland-Hawthorn, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 57, 227-303 (2019).
- 3 D. Rahner, E.W. Pellegrini, S.C.O. Glover, et al., *MNRAS*. – 2019. – Vol. 483. – P. 2547-2560.
- 4 A.F. McLeod, A.A. Ali, et al., *MNRAS*, 508, 5425 (2021).
- 5 P. Madau, & M. Dickinson, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 52, 415-486 (2014).
- 6 T. Fukushige, & D.C. Heggie, *MNRAS*, 276, 206-218 (1995).
- 7 A. Tanikawa, & T. Fukushige, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 57, 155-164 (2005).
- 8 A.J. Whitehead, S.L.W. McMillan, E. Vesperini, & S.P. Zwart, *The Astrophysical Journal*, 778, 118 (2013).
- 9 A. Ernst, P. Berczik, A. Just, & T. Noel, *Astronomische Nachrichten*, 336, 577-589 (2015).
- 10 R.C. Kennicutt, & N.J. Evans, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 50, 531-608 (2012).
- 11 M.R. Krumholz, C.F. McKee, & J. Bland-Hawthorn, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 57, 227-303 (2019).
- 12 R. Chandar, S.M. Fall, & B.C. Whitmore, *The Astrophysical Journal*, 711, 1263-1279 (2010).
- 13 Gaia Collaboration, et al., *Astronomy and Astrophysics*, 616, A1 (2018).
- 14 S.-Y. Tang, et al., *The Astrophysical Journal*, 877 (2019).
- 15 S. Röser, & E. Schilbach, *Astronomy and Astrophysics*, 627, A4 (2019).
- 16 S. Röser, E. Schilbach, & B. Goldman, *Astronomy and Astrophysics*, 621, L2 (2019).
- 17 S. Sharma, J. Bland-Hawthorn, K.V. Johnston, & J. Binney, *The Astrophysical Journal*, 730, 3 (2011).
- 18 B. Shukrgaliyev, G. Parmentier, A. Just, et al., *The Astrophysical Journal*, 863, 171 (2018).
- 19 B. Shukrgaliyev, G. Parmentier, P. Berczik, A. & Just, *MNRAS*, 486, 1045-1052 (2019).
- 20 B. Shukrgaliyev, G. Parmentier, P. Berczik, et al., *Star Clusters: From the Milky Way to the Early Universe*, 351, 507-511 (2020).
- 21 Astropy Collaboration, T.P. Robitaille, E.J. Tollerud, et al., *Astronomy and Astrophysics*, 558, A33 (2013).

A.B. Nazar^{*} , A.B. Manapbayeva , N.SH. Alimgazinova ,

M.T. Kyzgarina , A.M. Demessinova 

Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

* e-mail: nazar.aruzhan26@gmail.com

IDENTIFICATION OF YOUNG STAR OBJECTS NEAR DUST BUBBLE N10

Over the past decade, the most important observations of the interstellar medium have been made in the infrared and radio regions of electromagnetic radiation. Of particular interest were GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Midplane Survey Extraordinaire), MIPSGAL and WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) surveys of several areas of star formation. Distinctive features of the infrared view of the Galactic disk at wavelengths from 3.4 μm to 22 μm include regions of ionized hydrogen HII, infrared bubbles, young stellar objects, massive star formation, infrared dark clouds, diffuse dust, include hydrocarbons and radiation from millions of stars.

Based on current literature, infrared signatures in hot regions around young massive stars have been identified as dust bubbles, so in this paper, the regions around bubble N10, one of the northern infrared bubbles included in Churchwell's catalog, were investigated. Using archival data from the WISE and 2MASS catalogs, we searched for candidates for young stellar objects around the N10 dust bubble and found 117 emission objects. Koenig et al. (2014) plotted diagrams of their color indices and energy distribution in the spectrum for each studied object under different classification conditions. According to the results of studies around the infrared dust bubble N10, objects at an early stage of evolution were discovered: 13 objects are young class I stars and 13 objects are young class II stars, 3 objects are classified as transitional disks.

Key words: N10 bubble, infrared radiation, young stellar objects, interstellar medium, astronomical catalogs, WISE, 2MASS.

А.Б. Назар^{*}, А.Б. Манапбаева, Н.Ш. Алимагзинова, М.Т. Қызыгарина, А.М. Демесинова

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*email: nazar.aruzhan26@gmail.com

N10 шаң көпіршігі маңындағы жас жұлдыз объектілерін анықтау

Соңғы онжылдықта жұлдызаралық ортадағы ең маңызды бақылаулар электромагниттік сәулеленудің инфрақызыл және радио аймақтарында жасалды. Жұлдыздардың түзілінің бірнеше бағыттары бойынша GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Midplane Survey Extraordinaire), MIPSGAL және WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) барлаулары ерекше қызығушылық тудырды. Толқын ұзындығы 3,4 мкм-ден 22 мкм-ге дейінгі толқын ұзындығындағы Галактикалық дискінің, инфрақызыл көрінісінің айрықша белгілеріне иондалған сутегі аймақтары HII, инфрақызыл көпіршіктер, жас жұлдыздар объектілері, жұлдыздардың жаппай түзілуі, инфрақызыл қара бұлттар, диффуздық шаң, көмірсутектер мен миллиондаған жұлдыздардың сәулеленуі жатады.

Заманауи әдебиеттерге талдау жасау арқылы жас массивті жұлдыздардың айналасындағы қыздырылған аймақтардағы инфрақызыл белгілер шаң көпіршіктер екені анықталды, сол себепті бұл жұмыста Churchwell каталогына енгізілген солтүстік инфрақызыл көпіршіктердің бірі – N10 көпіршіктің айналасындағы аймақтар зерттелді. WISE, 2MASS каталогтарының мұрағаттық деректерін пайдалана отырып, біз N10 шаң көпіршігінің айналасындағы жас жұлдыздар объектілеріне үміткерлер ізdedік және 117 сәулелену объектілерін таптық. Koenig et al. (2014) зерттеушілерімен жасалған жіктеудің әртүрлі шарттарына сәйкес әрбір зерттелетін объект үшін олардың түс көрсеткіштері диаграммалары және спектріндегі энергияның таралуы болды. Жасалынған зерттеудің нәтижесі бойынша N10 инфрақызыл шаң көпіршігінің айналасында эволюцияның ерте сатысындағы объектілер анықталды: 13 объект – I

клас жас жұлдыздары және 13 объект – II класс жас жұлдыздары, 3 объект – өтпелі дискілер ретінде жіктелді.

Түйін сөздер: N10 көпіршік, инфрақызыл сәулелену, жас жұлдыздар объектілері, жұлдызаралық орта, астрономиялық каталогтар, WISE, 2MASS.

А.Б Назар*, А.Б. Манапбаева, Н.Ш. Алимгазинова, М.Т. Кызгарина, А.М. Демесинова

Казахский национальный университет им. аль Фараби Казахстан, г. Алматы

*e-mail: nazar.aruzhan26@gmail.com

Индентификация молодых звездных объектов вблизи пылевого пузыря N10

За последнее десятилетие важнейшие наблюдения межзвездной среды выполнены в инфракрасном и радиодиапазонах электромагнитного излучения. Особый интерес представляли обзоры GLIMPSE (экстраординарный инфракрасный обзор срединной плоскости галактики), MIPS GAL и WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) нескольких областей звездообразования. Отличительные особенности инфракрасного изображения галактического диска на длинах волн от 3,4 мкм до 22 мкм включают области ионизированного водорода HII, инфракрасные пузыри, молодые звездные объекты, массивное звездообразование, инфракрасные темные облака, диффузную пыль, включают углеводороды и излучение миллионов звезд.

Основываясь на современной литературе, инфракрасные сигнатуры в горячих областях вокруг молодых массивных звезд были идентифицированы как пылевые пузыри, поэтому в этой статье были исследованы области вокруг пузыря N10, одного из северных инфракрасных пузырей, включенных в каталог Черчвелла. Используя архивные данные из каталогов WISE и 2MASS, мы провели поиск кандидатов в молодые звездные объекты вокруг пылевого пузыря N10 и нашли 117 эмиссионных объектов. Кениг и др. (2014) построили графики их показателей цвета и распределения энергии в спектре для каждого исследуемого объекта при разных условиях классификации. По результатам исследований вокруг инфракрасного пылевого пузыря N10 были обнаружены объекты, находящиеся на ранней стадии эволюции: 13 объектов — молодые звезды I класса и 13 объектов — молодые звезды II класса, 3 объекта относятся к категории переходных дисков.

Ключевые слова: пузырь N10, инфракрасное излучение, молодые звездные объекты, межзвездная среда, астрономические каталоги, WISE, 2MASS.

Introduction

A bubble is a region filled with hot, ionized, relatively rarefied gas and surrounded by a denser cold shell [1]. The external shape of the expanded shell is directly related to the structure of the enclosed object, that is, the shell may change or disappear when it collides with seals or rarefied places. Therefore, it is difficult to study bubbles [2]. Bubbles are formed mainly with the help of energy emitted from the interior of stars [1]. Most of the interest in these infrared bubbles is related to their formation and development. In 1977, as a result of the study by B. Elmgreen and C. Lada, it was found that the shells around massive stars, accumulating matter surrounding the star or star clusters, can eventually become a large mass, as a result of which gravitational instability occurs in these shells themselves and the formation of secondary stars begins. This conclusion is now known as "collect-and-collapse", and it has been confirmed that it is one of the two main options for

the formation of stars. The second version works when the bubble expands, and the already existing membrane falls on it. Due to compression by hot gas and radiation, the bubbles become gravitationally unstable again and then re-form into a star or star cluster. In infrared bubble catalogs, in addition to small (probably young) bubbles, it was found that there are larger, that is, bubbles located in the shell of an old bubble. Bubbles are closely related to HII regions [3] are infrared signatures of heated regions around young massive stars and star halos with 8 μm rings, which trace the photodissociation region (PDR), which directly borders the region formed during the cloud compression and collapse process. Information and visual inspection of 12 and 24 μm data and a catalog of known bubbles [3] exceeds 5000, so understanding how these objects interact with their environment is of great importance for galactic star formation.

The purpose of this work is to search for and identify young stellar objects near the N10 bubble

based on ground-based and space infrared observations.

1. Data

In our study, the following catalogs of extensive surveys and infrared data were used: WISE, 2MASS. First, WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) is a 40-centimeter telescope in low Earth orbit. WISE maps the entire sky in four mid-infrared bands of 3.4, 4.6, 12, and 22 μm [4]. The location of these bands in the mid-infrared region corresponds to the region where excess radiation from young stars from the cool circumstellar disk or envelope material becomes important relative to the stellar photosphere. This fact suggests that WISE can easily be used as a tool for searching and classifying young stellar objects (YSOs), like the work done on Spitzer. However, given the specific set of science objectives, the WISE flux source extraction process is not optimized for the regions where these objects are most commonly encountered, including the galactic planes. Therefore, YSOs are usually found in the mid-infrared region, related to the thermal radiation of dust or the emission of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) dust, and in dark areas or densely concentrated areas such as infrared dark clouds [5]. These facts call for a better evaluation of WISE's performance in such regions before designing the schemes necessary to achieve

the goal of searching for YSOs. Observations of the near-infrared sky in J (1.25 μm), H (1.65 μm), and Ks (2.17 μm) obtained by 2MASS. 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (2003) and AllWISE Data Release (2013) were used in this work [6]. We can see results from 2MASS (Two Micron All-Sky Survey) in infrared and other wavelengths. 2MASS will make observations and collect data using two new, highly automated 1.3-meter telescopes. Each telescope here is equipped with a three-channel camera, each consisting of three different HgCdTe detectors in a 256 x 256 array that simultaneously scan the sky for J (1.25 μm), H (1.65 μm), and K (2.17 μm) waves. can observe in length. Observations are made when the arrays of 2MASS are pointed at the sky, while the telescopes are moving flat across the sky at a rate of ~1 foot per second [4].

2. N10 infrared dust bubble

N10 is one of the northern infrared bubbles in the Churchwell catalog. N10 shows a bubble centered at $\alpha_{2000} = 18^{\text{h}} 14^{\text{m}} 5,8^{\text{s}}$ and $\beta_{2000} = -17^{\circ} 28' 19''$ ($l = 13^{\circ}.188$, $b = 0^{\circ}.039$) [3]. This dust bubble has been identified by some scientists as MWP1G013189+000428. The kinematic distance of this bubble spans the range $\sim 4.7 \pm 0.5$ kpc. The specifications for N10 are shown in Table 1.

Table 1. Specifications for the N10

Object	Center point coordinates				Search radius	Additional information		
	Equatorial		Galactic					
	α R.A. (J2000) (hh:mm:ss.ss)	δ DE (J2000) (dd:mm:ss.ss)	l , deg	b , deg				
N10 bubble	18 14 5,8	-17 28 19	13°,17	0°,06	2,5 arcmin	$t = 9,17 * 10^4$		

On Figure 1 shows an image of a dust bubble N10 with a radius of 2.5 arcmin.



Figure 1 – An appearance of N10 dust bubble

N10 bubble distance was measured by Churchwell et al. (2006) [3] and Watson et al. (2008) [9] 4.9 kpc, Beaumont et al. (2010) at 4.1 kpc [7], Pandian et al. (2008) determined to be 4.6 kpc [8].

Based on the spectral lines of $^{12}\text{CO}(3-2)$, $\text{HCO}^+(4-3)$, $\text{N}_2\text{H}^+(4-3)$ and $\text{CH}_3\text{OH}(7(0, 7) - 6(0, 6))$, a high-mass cluster interacting with the N10 dust bubble was studied in detail. $\text{CH}_3\text{OH}(7(0, 7) - 6(0, 6))$ showed that a hot core is formed in the region of the JSON N10 bubble. And the position-velocity diagram of $\text{N}_2\text{H}^+(4-3)$ shows that the cold dense core of the cluster was not destroyed by star formation. Therefore, the mass of the N10 bubble is about It was taken as 27.44 M_\odot [10].

N10 is defined as a bright MIR and radio continuum bubble with an elliptical or slightly comet-like shape, with a cutoff at 160° galactic coordinate angle. In addition, at a frequency of about 1.4 GHz, the integral flux density of this bubble was found to be 7.58 J (Helfand et al. 2006) [12].

The surroundings of the N10 dust bubble in molecular radiations were studied. Infrared bubbles discovered for the first time by GLIMPSE at a wavelength of 8.0 μm are due to the expansion of the HII region and found to be an ideal region for star formation at its boundaries. N10 is a very interesting bubble because infrared studies of the content of young stars indicate a star formation scenario that began at the edge of the HII region. PMO 13.7 m $^{12}\text{CO}(1-0)$ and $^{13}\text{CO}(1-0)$ observations were made towards the N10 bubble. Bright emission of CO was detected, and physical parameters were determined from them by detecting two molecular thrombi. By comparing the dynamical age of this region and the fragmentation time scale, the star formation mechanism "radiation-induced explosion" was shown. The N10 bubble was of particular interest with the gas structures in the narrow boundary between the HII region and the surrounding molecular matter, as well as the age range of YSOs located in this region, thus indicating star formation [11].

3. Search for candidates for young stellar objects

Research and analysis of different regions of the interstellar medium have shown the presence of star-forming regions near dust bubbles [13, 14]. The N10 bubble is part of a large star-forming region that contains other bubbles, i.e. several small bubbles, many dark filaments and clusters between and around the bubbles [14].

To identify candidates for young stellar objects, we searched the WISE catalog at a distance of 2.5 arcmin from the origin of N10. A total of 117 objects were found. Data from the WISE Point Source Catalog provide information on young stellar objects

- this is the main table (Table 2). We first identify and then classify YSOs using a list of objects corresponding to 3.4, 4.6 and 12 μm . Scheme — K12 — Rebull et al. (2010) [15], Andrews et al. (2011) [16] and Cieza et al. (2012) based on [17] catalogs. For a better understanding of our young star candidates in a broad space of color and color magnitudes of astrophysical contamination, we review the catalog of AGB carbon stars [18], [19] and [20] and classical Be stars [21]. Extragalactic objects are found, and there are other types of galactic objects with excess amounts of visible infrared light in the left and central parts. A band of objects with approximately zero $w_1 - w_2$ color but a wide range of $w_2 - w_3$ color will be a mixture of the original types. At the same time, they may contain photospheres or main-sequence stars with occasional galaxies that give off a distinctly red color. Finally, some objects are either young transient disc stars or old and "fragmented disc" stars similar to VEGA[22].

Class I YSOs (protostellar candidates) are the reddest objects, and if their colors match, they are classified as:

$$w_2 - w_3 > 2.0,$$

$$\begin{aligned} w_1 - w_2 &> -0.42 \times (w_2 - w_3) + 2.2, \\ w_1 - w_2 &> 0.46 \times (w_2 - w_3) - 0.9, \end{aligned} \quad (1)$$

$$w_2 - w_3 < 4.5.$$

These conditions modify the K12 scheme to better represent class system-based partitions and eliminate contamination by false detections in the WISE 3 band. If the colors of class II YSOs (candidate T Tauri stars and Herbig AeBe) meet the following criteria, then the rest of the objects will be classified as follows:

$$\begin{aligned} w_1 - w_2 &> 0.25, \\ w_1 - w_2 &< 0.9 \times (w_2 - w_3) - 0.25, \\ w_1 - w_2 &> -1.5 \times (w_2 - w_3) + 2.1, \\ w_1 - w_2 &> 0.46 \times (w_2 - w_3) - 0.9, \\ w_2 - w_3 &< 4.5. \end{aligned} \quad (2)$$

To compensate for the relative reduction in sensitivity in WISE bands 3 and 4, we use the 2MASS J, H, Ks point source catalog automatically provided by the WISE catalog [23]. We can modify the K12 scheme and use the H – Ks and $w_1 - w_2$ color-color diagram to search for and classify YSOs. In the H – Ks color space, there is a trade-off between the reddening vector and the dust overemission vector compared to $w_1 - w_2$. In other words, it is easier to

identify a line fitting the standard extinction law that removes most of the extragalactic contamination from the H – Ks, w1 – w2 plot than from the Ks – w1, w1 – w2 plot, because there are reddened background galaxies and main-sequence stars can have colors similar to the disc's objects.

A change to our K12 scheme and the original concept of Spitzer-2MASS [24] is to not apply bias to the colors of the sources we classify. Without an independent loss reduction method for each source, we would make the wrong choice and classification based on photographs. Thus, the extinction vector in H-Ks compared to w1 – w2 is <0.3 mag, but in most cases it can be greater or less than 1, which means that some objects classified as class I protostars in this part of the sequence, red-painted class II stars are quite possible.

We search for YSO candidates among previously unclassified objects with a non-zero photometric error in 2MASS H and Ks using the following conditions and omit the conditions for the WISE 3 band:

$$\begin{aligned} H - Ks &> 0.0, \\ H - Ks &> -1.76 \times (w1 - w2) + 0.9, \\ H - Ks &< (0.55/0.16) \times (w1 - w2) - 0.85, \\ w1 &\leq 13.0. \end{aligned} \quad (3)$$

Some objects were originally assigned to class II. Class I stars are then grouped as subset candidates if the following condition is met:

$$H - Ks > -1.76 \times (w1 - w2) + 2.55. \quad (4)$$

The ratio under the above conditions (0.55/0.16) is obtained from the calculation of the ratio of color levels calculated with Ks > 1, so H – Ks, w1 – w2 has the most accurate representation of galaxies [25]. The general list of YSO candidates determined according to the conditions of [25] is given in Table 2.

On Figure 2 shows the dependence of color indicators according to the AllWISE catalog. It can be seen from Figure 2 that the color indicators of transitory disks occupy a smaller area than objects of class I. Candidates for class II objects will have a smaller difference in infrared fluxes than candidates for class I. Thus, we see candidates for young stellar objects grouped according to their stage of evolution.

The diagram in Figure 2 shows class I objects with red squares, class II objects with green circles, and transition disks with blue rhombuses. We identified 29 objects that confirm the previously established status of young stellar objects in various catalogs. Figure 3 shows the energy distribution spectrum (SED) for several candidates for young

stellar objects. As can be seen from Figure 3(a), a class I candidate is in good agreement with the conventional energy distribution diagram. Therefore, we can say that the objects we found are young stellar objects of class I. If class I, then they have high or flat SED. Then it can be assumed that the age of these objects is about $2 \cdot 10^5$ years, and the mass is $0.1 M_{\text{Sun}}$. Figure 3(b) shows the SED for a candidate for class II young stellar objects. Class II objects are pre-main-sequence stars with optically thick disks and must be up to about 10^6 years old and have a near-stellar disk mass of $0.01 M_{\text{Sun}}$. Transition disks are young stellar objects with optically thick excess emission at long wavelengths and no emission at short wavelengths. They are intermediate between classes II and III, so their age is about $0.5 \cdot 10^7 - 0.8 \cdot 10^7$ years.

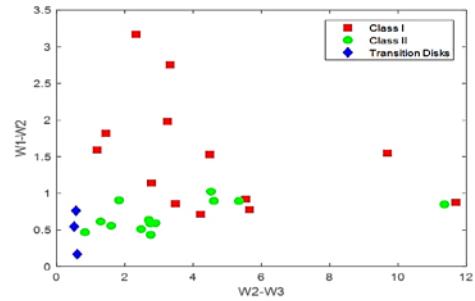


Figure 2 – Color diagram of sources found near the N10 dust bubble

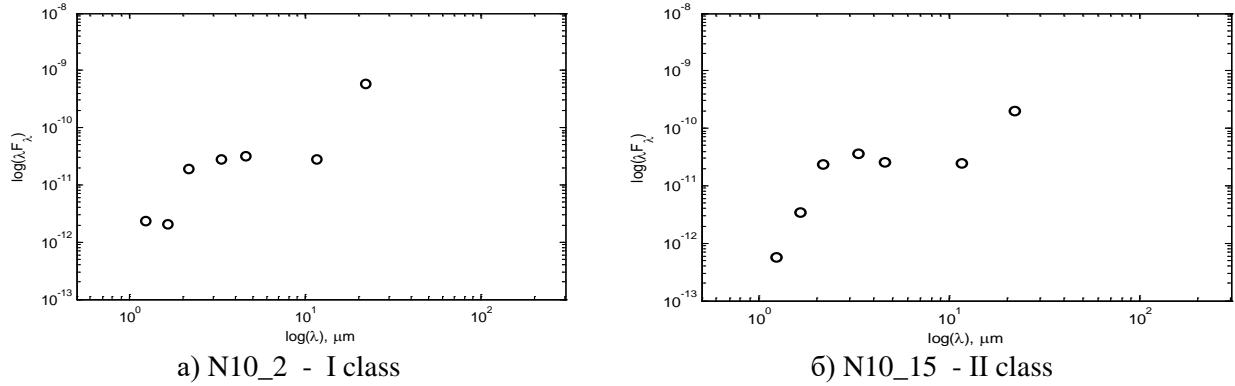
Thus, as our analysis shows, Koenig et al. (2014) [25] algorithm detects young stellar objects well.

Objects N10_2 and N10_15 are listed in the astronomical catalog as stars of spectral classes O4-6 and 06.5V. Stars of spectral class O have a high surface temperature — above 30000 Kelvin and are characterized by blue color. Spectral lines of ionized metals and ionized helium are found in their spectra. Neutral helium and hydrogen lines are also present, but they are weaker, and emission lines are also often present in their spectra. Class O is divided into subclasses from the earliest O2 to the late O9.7. When moving to later subclasses, the intensity of the neutral helium lines increases, and the ionized lines decrease. Only the most massive and brightest stars belong to this class. Their mass exceeds $20 M_{\text{Sun}}$, and their luminosity can reach several tens of thousands of solar luminosities and millions. Such stars live for a short time: in the main sequence, stars of such a mass and such a spectral class are about 3-6 million years old, so stars of the O class are very young objects. Therefore, such stars are indicators of recent star formation in the visible region, for example in OB communities where all stars formed from a single molecular cloud. Accordingly, we correctly identified N10_2 and N10_15 as young stellar objects. At the

same time, we see that object N10_2 is indeed smaller than N10_15, which corresponds to the spectral type and our criteria (N10_2 belongs to class I, and N10_15 belongs to class II).

Table 2 - General list of YSO candidates

Object	Catalog name	A R.A.(J2000) (hh:mm:ss.ss)	δ DE (J2000) (dd:mm:ss.ss)	W1, mag	W2, mag	W3, mag	W4, mag	J, mag	H, mag	K, mag	Class
N10_1	J181405.80 -172812.8	18 14 05.802000	-17 28 12.80784	9.100	7.552	-2.134	3.268	17.625	16.218	13.638	I
N10_2	J181405.47 -172837.9	18 14 05.473824	-17 28 37.90236	9.417	8.541	-3.149	-6.181	13.511	11.846	10.730	I
N10_3	J181404.94 -172730.5	18 14 04.948992	-17 27 30.56832	10.081	8.552	4.069	-0.537	16.467	14.594	13.589	I
N10_4	J181401.37 -172823.3	18 14 01.372344	-17 28 23.35404	11.937	8.766	6.442	0.629	0.000	0.000	0.000	I
N10_5	J181410.77 -172819.3	18 14 10.775064	-17 28 19.36740	9.995	8.855	6.081	0.734	15.537	14.912	11.744	I
N10_6	J181407.98 -172708.4	18 14 07.982064	-17 27 08.48700	9.978	7.224	3.903	1.187	18.125	17.128	13.945	I
N10_7	J181409.60 -172722.1	18 14 09.603312	-17 27 22.19616	9.274	7.294	4.049	1.312	18.123	16.575	13.071	I
N10_8	J181402.15 -172708.2	18 14 02.155800	-17 27 08.24940	10.877	10.015	6.538	2.244	16.499	15.563	13.141	I
N10_9	J181405.84 -172950.7	18 14 05.840856	-17 29 50.76600	11.121	10.199	4.665	0.042	17.874	15.135	14.087	I
N10_10	J181406.20 -173003.7	18 14 06.209568	-17 30 03.72852	10.611	9.836	4.188	-0.772	17.926	15.238	13.688	I
N10_11	J181408.31 -173019.1	18 14 08.310768	-17 30 19.10520	10.302	9.588	5.375	0.938	15.555	14.157	12.576	I
N10_12	J181410.34 -173022.8	18 14 10.344744	-17 30 22.82112	10.494	8.677	7.236	2.815	18.150	16.970	12.274	I
N10_13	J181400.12 -173021.6	18 14 00.129936	-17 30 21.63060	8.125	6.532	5.350	2.657	14.680	13.343	10.818	I
N10_14	J181404.45 -172830.7	18 14 04.458000	-17 28 30.71244	9.933	9.084	-2.273	0.708	17.100	14.203	13.417	II
N10_15	J181409.41 -172739.6	18 14 09.412776	-17 27 39.63744	10.355	9.331	4.811	0.229	17.644	14.938	14.223	II
N10_16	J181407.30 -172715.1	18 14 07.309056	-17 27 15.18696	10.302	9.408	4.072	-0.324	13.103	12.728	12.483	II
N10_17	J181403.92 -172659.9	18 14 03.920952	-17 26 59.96436	10.817	9.921	5.318	1.958	13.328	13.038	12.572	II
N10_18	J181411.09 -172903.8	18 14 11.090736	-17 29 03.84108	11.423	10.865	9.270	2.260	18.122	16.646	13.158	II
N10_19	J181413.58 -172903.9	18 14 13.581408	-17 29 03.91200	9.707	8.801	6.974	2.114	15.092	13.550	11.229	II
N10_20	J181403.36 -172617.6	18 14 03.369576	-17 26 17.64708	10.970	10.459	7.987	4.483	17.847	15.143	12.545	II
N10_21	J181414.64 -172821.2	18 14 14.647296	-17 28 21.24660	9.698	9.104	6.214	1.898	17.067	14.393	11.512	II
N10_22	J181411.42 -172958.4	18 14 11.427360	-17 29 58.42752	10.984	10.516	9.688	3.001	13.501	12.817	12.723	II
N10_23	J181407.78 -173031.9	18 14 07.789776	-17 30 31.92372	9.323	8.688	5.991	2.136	17.838	13.488	10.757	II
N10_24	J181406.92 -173036.4	18 14 06.921120	-17 30 36.46620	9.450	8.858	6.121	2.438	14.900	13.041	10.901	II
N10_25	J181358.24 -172953.7	18 13 58.241160	-17 29 53.78964	9.997	9.382	8.095	4.876	17.897	14.556	11.672	II
N10_26	J181411.88 -173020.6	18 14 11.887104	-17 30 20.65536	10.801	10.366	7.612	3.212	17.822	14.973	2.667	II
N10_27	J181411.53 -172925.0	18 14 11.532360	-17 29 25.03392	7.226	6.464	5.898	1.992	17.557	12.077	9.006	disk
N10_28	J181406.92 -173036.4	18 14 06.921120	-17 30 36.46620	9.450	8.858	6.121	2.438	14.900	13.041	10.901	disk
N10_29	J181403.02 -173042.0	18 14 03.021120	-17 30 42.06708	10.622	10.453	9.851	5.419	17.639	14.745	12.205	disk

**Figure 3** – SED candidates for young star objects

Conclusion

Using multiwavelength surveys and catalog data, we have investigated infrared emission objects around the N10 bubble. We have found 117 sources that we believe may be objects of young stars. However, due to 22 objects having unreliable fluxes at the considered wavelengths, we studied 95 objects. The classification was carried out according to the criteria of [25]. Among them, 13 objects - class I

young star objects, 13 objects - class II young star objects, 3 objects - transitional disks were identified. The rest of the sources do not correspond to these two classes and the transition disk according to all the classification criteria, so they require further investigation at other wavelengths of infrared radiation.

In conclusion, the study showed that all objects in the early stages of evolution are located around the N10 infrared dust bubble.

References

1. http://smartmoto.mospolytech.ru/news_new.php?id=183178
2. <https://www.computerra.ru/183178/bubblierhelp>
3. Churchwell E., Povich M. S., Allen D., Taylor M. G., Meade M. R., Babler B. L., ... Wolff M. J. The Bubbling Galactic Disk //The Astrophysical Journal. – 2006. – Vol. 649 (2). – P. 759-778.
4. Wright E.L., Eisenhardt P.R.M., Mainzer A.K., ... Chao-Wei Tsai. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): mission description and initial on-orbit performance //The Astronomical Journal. – 2010. – Vol. 140. – P. 1868-1881.
5. Rathborne J.M., Jackson J.M., & Simon R. Infrared Dark Clouds: Precursors to Star Clusters //The Astronomical Journal. – 2006. – Vol.641. – P. 389-405.
6. https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=II/246&-out.max=50&-out.form=HTML%20Table&-out.add=_r&-out.add=_RAJ,_DEJ&-sort=_r&-oc.form=sex.
7. Beaumont C.N. & Williams J.P. Molecular Rings Around Interstellar Bubbles and the Thickness of Star-Forming Clouds //The Astrophysical Journal. – 2010. – Vol. 709 (2). – P. 791-800.
8. Pandian J. D., Momjian E. and Goldsmith P.F. Resolving distance ambiguities towards 6.7 GHz methanol masers. //Astronomy and Astrophysics. – 2008. – Vol. 486. – P. 191-208.
9. Watson C., Povich M. S., Churchwell E. B., ... Whitney B. A. Infrared Dust Bubbles: Probing the Detailed Structure and Young Massive Stellar Populations of Galactic H II Regions // The Astrophysical Journal. – 2008. – Vol. 681. – P. 1341-135.
10. Ma Y., Zhou J., Esimbek J. et al. A detailed study of the high-mass clump interacting with the bubble N10. // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2013. – Vol. 345. – P. 297.
11. Gama D.R.G., Lepine J.R.D., Mendoza E., Wu Y., & Yuan J. CO observations and investigation of triggered star formation towards N10 infrared bubble and surroundings. // The Astrophysical Journal. – 2016. – Vol. 830 (2). – P. 57.
12. Helfand D.J., Becker R.H., White R.L., Fallon A., & Tuttle S. MAGPI: A multi-array galactic plane imaging survey. // The Astronomical Journal. – 2006. – Vol.131. – P. 2525.
13. Das S.R., Tej A., Vig S., Ghosh S.K. & Ishwara Chandra C.H. High-mass star formation toward southern infrared bubble S10 // The Astronomical Journal. – 2016. – Vol. 152 (5). – P. 16.
14. Sherman R. Investigation of Molecular Cloud Structure around Infrared Bubbles: CARMA Observations of N14, N22, and N74. // The Astrophysical Journal. – 2012. – Vol. 760 (1). – P. 15.

15. Rebull L.M., Padgett D.L., McCabe C.E., ... Wolf S. The taurus spitzer survey: New candidate taurus members selected using sensitive mid-infrared photometry // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2010. – Vol. 186 (2). – P. 259-307.
16. Andrews S.M., Wilner D.J., Espaillat C., ... Brown J.M. Resolved images of large cavities in protoplanetary transition disks. // The Astronomical Journal. – 2011. – Vol. 732. – P. 42.
17. Cieza L.A., Schreiber M.R., Romero G.A., ... Merin B. The nature of transition circumstellar disks. III. Perseus, Taurus, and Auriga //The Astronomical Journal. – 2012. – Vol. 750. – P. 157.
18. Alksnis A., Balklavs A., Dzervitis U., ... Pudure I. A general catalogue of galactic carbon stars by C.B. Stephenson. Third edition. – VizieR Online Data Catalog. – 2001. Vol. 3227.
19. Sjouwerman L.O., van Langevelde H.J., Winnberg A., & Habing H.J. A new sample of OH/IR stars in the Galactic center //Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 1998. – Vol. 128. – P. 35-65.
20. Lindqvist M., Winnberg A., Habing H.J., & Matthews H.E. OH/IR stars close to the Galactic Centre. I-Observational data. //Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 1992. – Vol. 92. – P. 43-62.
21. Mathew B., Subramaniam A., & Bhatt B.C. Be phenomenon in open clusters: results from a survey of emission-line stars in young open clusters //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2008. – Vol. 388. – P. 1879-1888.
22. Dominik C., & Decin G. Age Dependence of the Vega Phenomenon: Theory // The Astrophysical Journal. – 2003. – Vol. 598. – P. 626-635.
23. Skrutskie M.F., Cutri R.M., Stiening R., ... Wheelock S. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) //The Astronomical Journal. – 2006. – Vol. 131. – P. 1163-1183.
24. Gutermuth R.A., Megeath S.T., Myers P.C., ... Fazio G.G. A spitzer survey of young stellar clusters within one kiloparsec of the sun: cluster core extraction and basic structural analysis //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2009. – Vol. 184. – P. 18-83.
25. Koenig X.P. and Leisawitz D.T. A Classification Scheme for Young Stellar Objects Using the Wide-Field Infrared Survey Explorer AllWISE Catalog: Revealing Low-Density Star Formation in the Outer Galaxy. // The Astrophysical Journal. – 2014. – Vol. 791:131. – P.27.

References

1. http://smartmoto.mospolytech.ru/news_new.php?id
2. <https://www.computerra.ru/183178/bubblierhelp>
3. E. Churchwell, et al., ApJ, 649 (2), 759-778 (2006).
4. E.L. Wright, P.R. Eisenhardt, A.K. Mainzer, Chao-Wei Tsai, ApJ, 140, 1868-1881 (2010).
5. J.M. Rathborne, J.M. Jackson, R. Simon, ApJ, 641, 389-405 (2006).
6. https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=II/246&-out.max=50&-out.form=HTML%20Table&-out.add=_r&-out.add=_RAJ,_DEJ&-sort=_r&-oc.form=sex.
7. C.N. Beaumont, J.P. Williams, ApJ, 709 (2), 791-800 (2010).
8. J.D. Pandian, E. Momjian, P.F. Goldsmith, A&A, 486, 191-208 (2008).
9. C. Watson, M.S. Povich, E.B. Churchwell, B.A. Whitney, ApJ, 681, 1341-135 (2008).
10. Y. Ma, J. Zhou, J. Esimbek, ApJS, 345, 297 (2013).
11. D.R. Gama, J.R.D. Lepine, E. Mendoza, Y. Wu, J. Yuan, ApJ, 830 (2), 57 (2016).
12. D.J. Helfand, R.H. Becker, R.L. White, A. Fallon, S. Tuttle, ApJ, 131, 2525 (2006).
13. S.R. Das, A. Tej, S. Vig, S.K. Ghosh, C.H. Ishwara, ApJ, 152 (5), 16 (2016).
14. R. Sherman, ApJ, 760 (1), 15 (2012).
15. L.M. Rebull, D.L. Padgett, C.E. McCabe, S. Wolf, ApJS, 186 (2), 259-307 (2010).
16. S.M. Andrews, D.J. Wilner, C. Espaillat, J.M. Brown, ApJ, 732, 42 (2011).
17. L.A. Cieza, M.R. Schreiber, G.A. Romero, B. Merin, ApJ, 750, 157 (2012).
18. A. Alksnis, et al., A general catalogue of galactic carbon stars by C.B. Stephenson, (2001).
19. L.O. Sjouwerman, H.J. van Langevelde, A. Winnberg, H.J. Having, ApJS, 128, 35-65 (1998).
20. M. Lindqvist, A. Winnberg, H.J. Having, H.E. Matthews, AAS, 92, 43-62 (1992).
21. B. Mathew, A. Subramaniam, B.C. Bhatt, MNRAS, 388, 1879-1888 (2008).
22. C. Dominik, G. Decin, ApJ, 598, 626-635 (2003).
23. M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening, S. Wheelock, AJ, 131, 1163-1183 (2006).
24. R.A. Gutermuth, S.T. Megeath, P.C. Myers, G.G. Fazio, ApJS, 184, 18-83 (2009).
25. X.P. Koenig, D.T. Leisawitz, ApJ, 791 (131), 27 (2014).

2- б ө л і м

**КОНДЕНСИРЛЕНГЕН КҮЙ ФИЗИКАСЫ
ЖӘНЕ МАТЕРИАЛТАНУ ПРОБЛЕМАЛАРЫ
НАНОФЫЛЫМ**

Section 2

**CONDENSED MATTER PHYSICS
AND MATERIALS SCIENCE PROBLEMS
NANOSCIENCE**

Р а з д е л 2

**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
И ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ
НАНОНАУКА**

Б.Е. Жумадилов^{1,2} , А.К. Кенжегулов³ , Б.С. Медьянова¹ , А.Т. Оспанали¹ ,
Г.С. Суюндыкова¹ , Г. Партизан¹ , Е. Ерланұлы² , М.Т. Габдуллин^{2*} 

¹Лаборатория вакуумных нанотехнологий, Институт проблем горения, Казахстан, г. Алматы

²Казахско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы

³АО «Институт металлургии и обогащения» при НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», Казахстан, г. Алматы

*e-mail: gabdullin@physics.kz

СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН И АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДОВ МЕТОДОМ КИСЛОРОДНО-АЦЕТИЛЕНОВОЙ ГОРЕЛКИ

В данной работе представлен синтез углеродных нановолокон и алмазоподобных углеродов методом кислородно-ацетиленовой горелки. В качестве источника углерода был использован ацетилен, а в качестве катализатора были использованы металлические пленки, напыленные на кремниевые подложки. Морфологические и структурные свойства полученных углеродных наноматериалов были изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. При проведении экспериментов было изучено влияние продолжительности синтеза и соотношения концентраций газов на формирование структуры осаждаемых образцов. Алмазоподобный углерод был синтезирован при низкой скорости потока газов и коротком времени синтеза, а при увеличении этих параметров были получены углеродные нановолокна. Синтезированные углеродные нановолокна обладают цилиндрической формой с диаметром порядка 50 – 215 нм, при этом их длина достигает нескольких микрометров. Размеры алмазоподобных углеродов варьируются в пределах от 150 до 580 нм. Спектроскопия комбинационного рассеяния света определила, что углеродные нановолокна отличаются более хорошей степенью упорядоченности и графитизации. По результатам исследований, проведенных в данной работе, кислородно-ацетиленовая горелка может быть использована в качестве перспективной, низкозатратной альтернативой для крупномасштабного производства углеродных наноматериалов.

Ключевые слова: углеродные наноматериалы, углеродные нановолокна, алмазоподобный углерод, кислородно-ацетиленовая горелка, сканирующая электронная микроскопия, комбинационное рассеяние света.

B.E. Zhumadilov^{1,2}, A.K. Kenzhegulov³, B.S. Medyanova¹, A.T. Ospanali¹,
G.S. Suyundykova¹, G. Partizan¹, Ye. Yerlanuly², M.T. Gabdullin^{2*}

¹Laboratory of Vacuum Nanotechnology, Institute of Combustion Problems, Kazakhstan, Almaty

²Kazakh-British Technical University, Kazakhstan, Almaty

³Satbayev University, Institute of Metallurgy and ore beneficiation, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: gabdullin@physics.kz

Synthesis of carbon nanofibers and diamond-like carbons by the oxygen-acetylene torch method

This work presents the synthesis of carbon nanofibers and diamond-like carbons by the oxygen-acetylene burner method. Acetylene was used as a carbon source, and metallic films sprayed on silicon substrates were used as a catalyst. The morphological and structural properties of the obtained carbon nanomaterials were studied by scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. The influence of the synthesis duration and gas concentration ratio on the structure formation of the deposited samples was studied during the experiments. Diamond-like carbon was synthesized at low gas flow rates and short synthesis times, and carbon nanofibers were obtained when these parameters were increased. The synthesized carbon nanofibers have a cylindrical shape with a diameter of about 50 to 215 nm, and their length reaches several micrometers. The size of diamond-like carbons ranges from 150 to 580 nm. Raman spectroscopy determined that carbon

nanofibers have a better degree of ordering and graphitization. According to the results of the studies carried out in this work, the oxygen-acetylene burner can be used as a promising, low-cost alternative for the large-scale production of carbon nanomaterials.

Key words: carbon nanomaterials, carbon nanofibers, diamond-like carbon, oxygen-acetylene torch, scanning electron microscopy, Raman spectroscopy.

Б.Е. Жумадилов^{1,2}, А.К. Кенжегулов³, Б.С. Медьянова¹, А.Т. Оспанали¹,
Г.С. Суюндыкова¹, Г. Партизан¹, Е. Ерланұлы², М.Т. Габдуллин^{2*},

¹Вакуумдық нанотехнологиялар зертханасы, Жану проблемалары институты, Қазақстан, Алматы қ.

²Қазақстан-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

³Сәтбаев университеті, Металлургия және кен байыту институты, Қазақстан, Алматы қ.

*email: gabdullin@physics.kz

Оттегі-ацетиленді жанарғы әдісімен көміртекті наноталшықтарды және алмаз тәріздес көміртектерді синтездеу

Бұл жұмыста оттегі-ацетиленді жанарғы әдісімен көміртекті наноталшықтар мен алмаз тәрізді көміртектердің синтезі ұсынылған. Көміртегінің көзі ретінде ацетилен пайдаланылды, ал кремний төсөнішінің бетіне тозаңдатылған металл қабыршықтары катализатор ретінде қолданылды. Алынған көміртекті наноматериалдардың морфологиялық және құрылымдық қасиеттері сканерлеуші электронды микроскопия және жарықтың комбинациялық шашырау спектроскопиясы көмегі арқылы зерттелінді. Эксперименттер жүргізу барысында тұндырылған үлгілердің құрылымын қалыптастыруға синтез ұзақтығы мен газ концентрациясының арақатынасының әсері зерттелінді. Алмаз тәрізді көміртек газ ағынының төменгі жылдамдық барысында және синтездің қысқа уақыт кезінде синтезделді, ал бұл параметрлер жоғарылаған кезде көміртекті наноталшықтар алынды. Синтезделген көміртекті наноталшықтардың диаметрі шамамен 50 – 215 нм болатын цилиндрлік пішінге ие, сонымен қатар олардың ұзындығы бірнеше микрометрге жетеді. Алмаз тәрізді көміртектердің мөлшері шамамен 150-ден 580 нм-ге дейін өзгереді. Жарықтың комбинациялық шашырау спектроскопиясы көміртекті наноталшықтардың реттілік пен графиттенудің айтарлықтай жақсы дәрежесімен ерекшеленетінін анықтады. Осы жұмыста жүргізілген талдаулардың зерттеу нәтижелері бойынша оттегі-ацетиленді жанарғы көмегімен көміртекті наноматериалдарды ауқымды өндіру үшін перспективті және арзан балама ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: көміртекті наноматериалдар, көміртекті наноталшықтар, алмаз тәрізді көміртек, оттегі-ацетиленді жанарғы, сканерлеуші электронды микроскопия, жарықтың комбинациялық шашырауы.

Введение

Углеродные наноматериалы (УНМ) стремительно развиваются в связи с ростом потребностей во многих направлениях, в числе которых индустрия, сельское хозяйство, здравоохранение и радиоэлектроника [1-3]. В настоящее время известны девять аллотропных модификаций углерода, такие как графен, фуллерен, нанотрубки, нановолокна, наноалмазы [4-6] и т.д. Углеродные нановолокна (УНВ) представляют собой цилиндрическиеnanoструктуры с графеновыми слоями, расположенные в виде уложенных конусов [7]. УНВ обладают превосходными механическими и химическими свойствами, также отличаются небольшим весом, простотой обработки, стойкостью к коррозии и хорошей армирующей

способностью [8, 9]. Алмазоподобный углерод (АПУ – один из видов аморфного углерода, который демонстрирует ряд характерных свойств алмаза [10]. Пленки АПУ отличаются высокой твердостью, значительной износостойкостью, низким коэффициентом трения, химической стабильностью, хорошими газобарьерными свойствами, антигорючими свойствами, высокой биосовместимостью [10, 11]. Благодаря своим уникальным электронным, механическим и физико-химическим свойствам УНМ нашли обширное применение в электронной технике [12], хранении энергии [13], композитных материалах [14], биомедицине [15], энергетике [16] и в машиностроении [17].

Существуют различные методы и технологии синтеза УНМ, такие как химическое осаждение из газовой фазы CVD [18, 19], плазменно-

химическое осаждение из газовой фазы PECVD [20, 21], лазерная аблация [22, 23], дуговой разряд [24, 25], пиролиз [26, 27], электроспиннинг [28, 29], плазменная струя [30, 31] и т.д. Однако некоторые из этих методов требуют особых технологических условий, таких как использование дорогостоящих высокотемпературных плазменных оборудования, большие энергозатраты и низкий выход являются препятствиями для применения плазменных технологий в промышленности [32, 33]. В этой связи создание и совершенствование недорогого и высокопроизводительного метода получения УНМ является одной из наиболее приоритетных задач.

Кислородно-ацетиленовая горелка является не дорогим и перспективным методом осаждения УНМ благодаря своим превосходным характеристикам, таким как высокая скорость осаждения, возможность проведения осаждения на открытом воздухе, простота конструкции оборудования и т.д. Данный метод имеет потенциал для непрерывного производства в больших объемах при сниженных затратах по сравнению с другими методами [33, 34]. Учитывая вышеизложенное, в данной работе

исследован синтез различных УНМ методом кислородно-ацетиленовой горелки, а также изучено влияние металлических катализаторов на формирование структуры.

Материалы и методы

Схема экспериментальной установки представлено в работе [35]. Установка состоит из двух кислородно-ацетиленовых горелок, держателя подложки с водяным охлаждением и двух массовых расходомеров газа. Прежде всего, образцы кремния марки BPS-20 очищали химическим методом в ультразвуковой ванне, в растворе смеси гидрата аммиака (NH_4OH), перекись водорода (H_2O_2) и дистиллированной воды в соотношении объема 1:1:4.

Напыление металлических покрытий на поверхности кремниевой пластины проводились с помощью магнетронного метода. На рисунке 1 представлено СЭМ изображение поперечного сечения тонкой медной и никелевой пленки на кремниевой подложке, толщина медной пленки составляет 446,8 нм (рис. 1а), толщина никелевой пленки составляет 427,4 нм (рис. 1б).

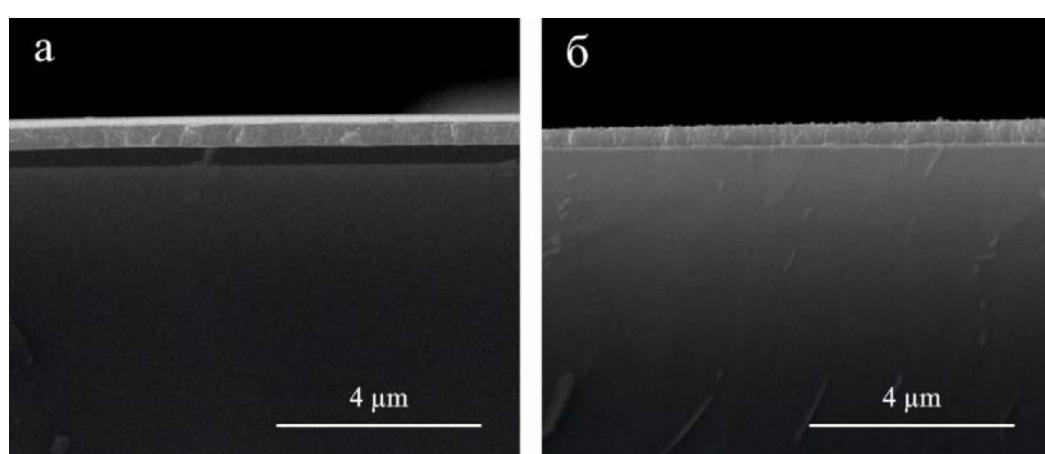


Рисунок 1 – СЭМ изображение поперечного сечения тонкой металлической пленки на кремниевой подложке: а – медь, б – никель

Ряд экспериментов был осуществлен на кремниевой пластине с тонкой пленкой металлического катализатора, в которой параметры синтеза составило: расстояние от сопла горелки до подложки $h = 4$ мм, диаметр сопла – 1,0 мм, длительность напыления $t = 15$ мин, 45 мин, угол наклона фронта пламени $\alpha = 90^\circ$, соотношение концентраций кислорода и ацетилена $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 = 0.90, 0.92$. В смеси газов, использовавшихся для создания пламени, имеется избыток ацетилена над кислородом.

Избыток ацетилена образует так называемое ацетиленовое перо, в котором происходят сложные химические реакции [33, 34]. Параметры синтеза показаны в таблице 1.

Для характеристики морфологии поверхности и структурное качество полученных образцов исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) Quanta 3D 200i и комбинационного рассеяния света (КРС) NT-MDT Tegra Spectra (длина волны лазерного излучения $\lambda = 473$ нм).

Таблица 1 – Параметры синтеза углеродных наноматериалов методом кислородно-ацетиленовой горелки

Эксперимент	CNMs	<i>h</i> , мм	<i>t</i> , мин	Расход O ₂ , slpm	Расход C ₂ H ₂ , slpm	<i>C</i> , O ₂ /C ₂ H ₂	Катализатор
№ 1	CNFs	4	45	0.27	0.30	0.90	Cu
№ 2	DLC	4	15	0.23	0.25	0.92	Ni

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены СЭМ изображения УНВ и АПУ, полученных методом кислородно-ацетиленовой горелки. Морфология УНВ, синтезированных в эксперименте № 1 показана на рисунке 2а, б. Из

СЭМ изображения видно, что на поверхности подложки были осаждены волокнистые структуры. Синтезированные УНВ имеют цилиндрическую форму с диаметром порядка от 50 до 215 нм. По наблюдениям СЭМ, длина УНВ достигает нескольких микрометров.

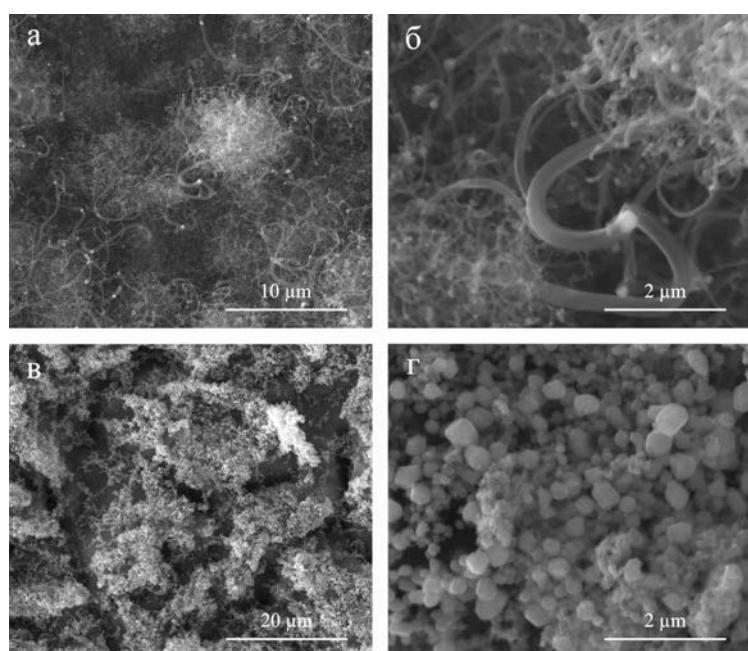


Рисунок 2 – СЭМ изображение УНМ: а, б – УНВ; в, г – АПУ

СЭМ-изображения поверхности АПУ показана на рисунке 2в, г, осажденных в эксперименте № 2. СЭМ-изображения показывают, что полученные углеродные структуры, имеют четкие кристаллографические форму и можно заметить присутствие множественных двойников, а также наличие вторичного роста, т.е. кристаллов, зародившихся на ранее существовавших кристаллах. Размер отдельных кристаллитов варьируется порядка от 150 до 580 нм.

Далее были проведены анализы КРС полученных образцов. На рисунке 3 показан спектры комбинационного рассеяния УНВ и АПУ, синтезированных методом кислородно-ацетиленовой горелки. Данные анализа

рамановской спектроскопии показаны в таблице 2.

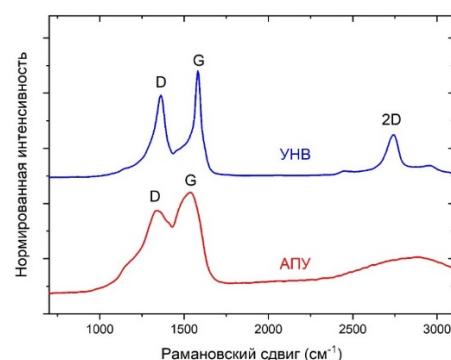


Рисунок 3 – Рамановская спектроскопия УНМ: УНВ, АПУ

Таблица 2 – Данные анализа рамановской спектроскопии.

	УНВ	АПУ
G peak position	1581,80	1540,36
D peak position	1363,09	1330,51
2D peak position	2742,02	-
FWHM G	39,62	186,82
FWHM D	85,53	219,74
I(D)/I(G)	0,71	0,86
I(2D)/I(G)	0,39	-

Спектры КРС УНВ характеризуются интенсивным D-модом около 1363 см^{-1} . Хорошо известно, что D-мода тесно связана с неупорядоченными структурами в углеродных материалах. G мода проявляется при 1582 см^{-1} , что свидетельствует о наличии в УНВ графитоуглерода [36, 37]. Вторая область спектра образца состоит из 2D мода. На основании наличия отчетливо выраженного 2D пика и меньшего отношения интенсивности D и G пика ($I(D)/I(G) = 0,71$) можно предположить, что УНВ, полученные методом кислородно-ацетиленовой горелки на кремниевой подложке в эксперименте №1, имеют хорошую степень упорядоченности и графитизации.

Рамановские спектры образца полученных в эксперименте №2, показан на рисунке 3. На этом рисунке виден сильный пик при 1330 см^{-1} (D-полоса), что подтверждает преобладающее присутствие фазы кубического алмаза. Широкий фон при 1540 см^{-1} (G-полоса) обусловлен аморфным углеродом, который

всегда присутствует в небольших количествах [38, 39]. Это позволяет предположить, что синтезированные пленки являются типичными пленками алмазоподобного углерода.

Заключение

В ходе исследования, кислородно-ацетиленовая горелка была использована для получения УНВ и АПУ при различных параметрах синтеза. Ацетилен в качестве источника углерода и металлические пленки в качестве катализатора были использованы для синтеза УНМ. Синтез УНВ длился 45 мин, пленка меди использовалася в качестве катализатора. На изображениях СЭМ видны волокнистые структуры с диаметром от 50 до 215 нм. Были также синтезированы АПУ при 15 мин времени синтеза, с размером от 150 до 580 нм, в качестве катализатора был использован пленка никеля. Рамановская спектроскопия подтвердила образование УНВ и АПУ. УНВ отличаются более хорошей степенью упорядоченности и графитизации. Данные результаты дают возможность для промышленного синтеза УНМ, так как кислородно-ацетиленовая горелка является относительно простым и экономически выгодным методом.

Благодарности

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP08856684).

Литература

1. Luo, Mingchuan, and Shaojun Guo. Strain-controlled electrocatalysis on multimetallic nanomaterials //Nature Reviews Materials. – 2017. – Vol. 2(11). – P. 1-13.
2. Yang Y. et al. Graphene-based materials with tailored nanostructures for energy conversion and storage // Mater. Sci. Eng. R Reports. – 2016. – Vol. 102. – P. 1-72.
3. Tae-Hee H. et al. Extremely efficient flexible organic light-emitting diodes with modified graphene anode // Nat. Photonics. – 2012. – Vol. 6(2). – P. 105-110.
4. Villarreal, Claudia C., et al. Carbon allotropes as sensors for environmental monitoring // Current Opinion in Electrochemistry. – 2017. – Vol. 3(1). – P.106-113.
5. Nasir, Salisu, et al. Carbon-based nanomaterials/allotropes: A glimpse of their synthesis, properties and some applications // Materials. – 2018. – Vol. 11(2). – P. 295.
6. Islam, Md Saidul, Yuta Shudo, and Shinya Hayami. Energy conversion and storage in fuel cells and supercapacitors from chemical modifications of carbon allotropes: State-of-art and prospect // Bulletin of the Chemical Society of Japan. – 2022. – Vol. 95(1). – P. 1-25.
7. Suarez-Martinez, Irene, Nicole Grobert, and Christopher Ewels. Nomenclature of sp₂ carbon nanoforms // Carbon. – 2011. – Vol. 50. – P. 741-747.
8. Sebastián D., Suelves I., La’zaro M.J., Moliner R. Carbon nanofibers as electrocatalyst support for fuel cells: effect of hydrogen on their properties in CH₄ decomposition // Power Sources. – 2009. – Vol. 192. – P. 51-56.

9. Sebastián D., Ruiz A.G., Suelves I., Moliner R., Laízaro M.J. On the importance of the structure in the electrical conductivity of fishbone carbon nanofibers // Mater. Sci. – 2013. – Vol. 48. – P. 1423-1435.
10. Lu, Yimin, et al. Fabrication and applications of the optical diamond-like carbon films: a review // Journal of Materials Science. – 2022. – Vol. 48. – P. 1-22.
11. Love, C. A., et al. Diamond like carbon coatings for potential application in biological implants—a review // Tribology International. – 2013. – Vol. 63. – P. 141-150.
12. Jariwala, Deep, et al. Carbon nanomaterials for electronics, optoelectronics, photovoltaics, and sensing // Chemical Society Reviews. – 2013. – Vol. 42.7. – P. 2824-2860.
13. Pumera, Martin. Graphene-based nanomaterials for energy storage // Energy & Environmental Science. – 2011. – Vol. 4(3). – P. 668-674.
14. Ku, Sook Hee, Minah Lee, and Chan Beum Park. Carbon-based nanomaterials for tissue engineering // Advanced healthcare materials. – 2013. – Vol. 2(2). – P. 244-260.
15. Teradal, Nagappa L., and Raz Jelinek. Carbon nanomaterials in biological studies and biomedicine // Advanced healthcare materials. – 2017. – Vol. 6(17). – P. 1700574.
16. Menéndez-Manjón, Ana, et al. Nano-energy research trends: bibliometrical analysis of nanotechnology research in the energy sector // Journal of Nanoparticle Research. – 2011. – Vol. 13(9). – P. 3911-3922.
17. Ndukwu, M. C., et al. Nanomaterials application in greenhouse structures, crop processing machinery, packaging materials and agro-biomass conversion // Materials science for energy technologies. – 2020. – Vol. 3. – P. 690-699.
18. Yu, Jingxue, et al. Synthesis of high quality two-dimensional materials via chemical vapor deposition // Chemical science. – 2015. – Vol. 6(12). – P. 6705-6716.
19. Choi, Dong Sung, et al. Low-temperature chemical vapor deposition synthesis of Pt-Co alloyed nanoparticles with enhanced oxygen reduction reaction catalysis // Advanced materials. – 2016. – Vol. 28(33). – P. 7115-7122.
20. Liu, Rulin, et al. Synthesis of carbon nanowall by plasma-enhanced chemical vapor deposition method // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2014. – Vol. 14(2). – P. 1647-1657.
21. Nozaki, Tomohiro, et al. A pressure-dependent selective growth of single-walled and multi-walled carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition // Carbon. – 2010. – Vol. 48(1). – P. 232-238.
22. Ismail, Raid A., et al. Preparation and characterization of carbon nanotubes by pulsed laser ablation in water for optoelectronic application. // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2020. – Vol. 119. – P. 113997.
23. Ganash, Entesar A., Ghaliyah A. Al-Jabarti, and Reem M. Altuwirqi. The synthesis of carbon-based nanomaterials by pulsed laser ablation in water // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 7(1). – P. 015002.
24. Zhang, Da, et al. Controllable synthesis of carbon nanomaterials by direct current arc discharge from the inner wall of the chamber // Carbon. – 2019. – Vol. 142. – P. 278-284.
25. Corbella, Carles, et al. "Pulsed anodic arc discharge for the synthesis of carbon nanomaterials." // Plasma Sources Science and Technology 28.4 (2019): 045016.
26. Yao, Dingding, and Chi-Hwa Wang. Pyrolysis and in-line catalytic decomposition of polypropylene to carbon nanomaterials and hydrogen over Fe-and Ni-based catalysts // Applied Energy. – 2020. – Vol. 265. – P. 114819.
27. Zhang, Shun, et al. Sustainable production of value-added carbon nanomaterials from biomass pyrolysis // Nature Sustainability. – 2020. – Vol. 3(9). – P. 753-760.
28. Shi, Xiaomin, et al. Electrospinning of nanofibers and their applications for energy devices // Journal of Nanomaterials. – 2015. – Vol. 2015. – P. 20.
29. Ding, Yichun, et al. Electrospun polyimide nanofibers and their applications // Progress in Polymer Science. – 2016. Vol. 61. – P. 67-103.
30. Kuok, Fei-Hong, et al. Application of atmospheric-pressure plasma jet processed carbon nanotubes to liquid and quasi-solid-state gel electrolyte supercapacitors // Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 425. – P. 321-328.
31. Fronczak, Maciej, et al. Continuous and catalyst free synthesis of graphene sheets in thermal plasma jet // Chemical Engineering Journal. – 2017. – Vol. 322. – P. 385-396.
32. Zhang, Biao, et al. Recent advances in electrospun carbon nanofibers and their application in electrochemical energy storage // Progress in Materials Science. – 2016. – Vol. 76. – P. 319-380.
33. Oulanti, Hanae, et al. Growth of carbon nanotubes on carbon fibers using the combustion flame oxy-acetylene method // Carbon. – 2015. – Vol. 95. – P. 261-267.
34. Liu, Ting-Chi, and Yuan-Yao Li. Synthesis of carbon nanocapsules and carbon nanotubes by an acetylene flame method // Carbon. – 2006. Vol. 44(10). – P. 2045-2050.
35. Zhumadilov, Bauyrzhan, et al. Synthesis of carbon nanostructures on copper films by the method of oxy-acetylene torch // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 31. – P. 412-416.

36. Kim, Yoong A., et al. Carbon nanofibers // Springer handbook of nanomaterials. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2013. – P. 233-262.
37. Lei, Shu-mei, et al. Deposition of carbon nanofibers on a low carbon steel substrate using an oxy-acetylene reducing flame // New Carbon Materials. – 2007. – Vol. 22(1). – P. 70-73.
38. Pang, Hua, et al. Characterization of diamond-like carbon films by SEM, XRD and Raman spectroscopy // Applied surface science. – 2010. – Vol. 256(21). – P. 6403-6407.
39. Ray, Sekhar C., W. F. Pong, and P. J. T. S. F. Papakonstantinou. Iron, nitrogen and silicon doped diamond like carbon (DLC) thin films: A comparative study // Thin Solid Films. – 2016. – Vol. 610. – P. 42-47.

References

1. M. Luo, and G. Shaojun, Nature Reviews Materials 2.11, 1-13 (2017).
2. Y. Yang et al., Mater. Sci. Eng. R Reports 102, 1-72 (2016).
3. H. Tae-Hee et al., Nat. Photonics 6.2, 105-110 (2012).
4. C.C. Villarreal, et al., Current Opinion in Electrochemistry 3.1, 106-113 (2017).
5. S. Nasir, et al., Materials 11.2, 295 (2018).
6. Islam, Md Saidul, Yuta Shudo, and Shinya Hayami, Bulletin of the Chemical Society of Japan 95.1, 1-25 (2022).
7. I. Suarez-Martinez, N. Grobert, and C. Ewels, Carbon. 50, 741-747 (2011).
8. D. Sebastia'n, I. Suelves, M.J. La'zaro, R. Moliner, Power Sources 192, 51-56 (2009).
9. D. Sebastia'n, A.G. Ruiz, I. Suelves, R. Moliner, M.J. La'zaro, Mater. Sci. 48, 1423-1435 (2013).
10. Y. Lu, et al., Journal of Materials Science 1-22 (2022).
11. C.A. Love, et al., Tribology International 63, 141-150 (2013).
12. D. Jariwala, et al., Chemical Society Reviews 42.7, 2824-2860 (2013).
13. M. Pumera, Energy & Environmental Science 4.3, 668-674 (2011).
14. S. Hee Ku, et al., Advanced healthcare materials 2.2, 244-260 (2013).
15. N.L. Teradal and J. Raz, Advanced healthcare materials 6.17, 1700574 (2017).
16. A. Menéndez-Manjón, et al., Journal of Nanoparticle Research 13.9, 3911-3922 (2011).
17. M.C. Ndukwu, et al., Materials science for energy technologies 3, 690-699 (2020).
18. J. Yu, et al., Chemical science 6.12, 6705-6716 (2015).
19. D.S., Choi, et al., Advanced materials 28.33, 7115-7122 (2016).
20. R. Liu, et al., Journal of Nanoscience and Nanotechnology 14.2, 1647-1657 (2014).
21. T. Nozaki, et al., Carbon 48.1, 232-238 (2010).
22. R. A. Ismail, et al., Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures 119, 113997 (2020).
23. E.A. Ganash, et al., Materials Research Express 7.1, 015002 (2019).
24. D. Zhang, et al., Carbon 142, 278-284 (2019).
25. C. Corbella, et al., Plasma Sources Science and Technology 28.4, 045016 (2019).
26. D. Yao, and Chi-Hwa Wang. Applied Energy 265, 114819 (2020).
27. S. Zhang, et al., Nature Sustainability 3.9, 753-760 (2020).
28. X. Shi, et al., Journal of Nanomaterials 2015, 20 (2015).
29. Y. Ding, et al., Progress in Polymer Science 61, 67-103 (2016).
30. Fei-Hong Kuok, et al., Applied Surface Science 425, 67-103 (2017).
31. M. Fronczak, et al., Chemical Engineering Journal 322, 385-396 (2017).
32. B. Zhang, et al., Progress in Materials Science 76, 319-380 (2016).
33. H. Oulanti, et al., Carbon 95, 261-267 (2015).
34. Ting-Chi Liu, and Yuan-Yao Li. Carbon 44.10, 2045-2050, (2006).
35. B. Zhumadilov, et al., Materials Today: Proceedings. 31. 412-416 (2020).
36. Y.A. Kim, et al., Springer handbook of nanomaterials, (Springer, Berlin, Heidelberg, 2013), pp.233-262.
37. Shu-mei Lei, et al., New Carbon Materials 22.1, 70-73 (2007).
38. H. Pang, et al., Applied surface science 256.21, 6403-6407 (2010).
39. S.C. Ray, et al., Thin Solid Films 610, 42-47 (2016).

МРНТИ 29.19.31

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v83.i4.04>

Д.Б. Толубаева¹ , Л.В. Гриценко^{2*} 

¹Карагандинский индустриальный университет, Казахстан, г. Темиртау

²Satbayev University, Kazakhstan, г. Алматы

*e-mail: gritsenko_lv@mail.ru

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОСЕНСОРОВ ОТ МОРФОЛОГИИ СЛОЁВ ОКСИДА ЦИНКА

Сахарный диабет, связанный с дефицитом инсулина и высокой концентрацией глюкозы в крови, является одной из основных причин смерти и инвалидности в мире. Непрерывный мониторинг уровня глюкозы в крови позволяет предотвратить болезни сердца, почечную недостаточность или слепоту. В связи с этим необходима быстрая, точная и экономичная идентификация уровня глюкозы в крови. Поэтому изготовление экономичного, простого в использовании, точного, портативного и быстрого биосенсора для определения глюкозы имеет решающее значение при сахарном диабете. Широкое распространение получили электрохимические биосенсоры для идентификации глюкозы. В данной работе массивы высокоориентированных наностержней ZnO, полученных низкозатратным методом химического осаждения из раствора, были использованы в качестве амперометрического ферментативного электрода, в котором глюкозооксидаза (GOx) была иммобилизирована посредством физической адсорбции. Исследованы морфология, оптические и электрохимические свойства изготовленного модифицированного электрода ITO/ZnO/GOx/Нафлон. Изучено влияние морфологии слоёв оксида цинка на активность фермента и биосенсора. Полученные модифицированные электроды ITO/ZnO/GOx/Нафлон с массивами упорядоченных тонких наностержней ZnO показали высокую чувствительность $\sim 50 \text{ мкA/mM}\cdot\text{см}^2$ при обнаружении глюкозы в растворе, т.е. наностержни ZnO с высокой удельной площадью поверхности являются прекрасной платформой для иммобилизации глюкозооксидазы в биосенсорах.

Ключевые слова: оксид цинка, электрохимические свойства, биосенсор, глюкоза.

D.B. Tolubayeva¹, L.V. Gritsenko^{2*}

¹Karaganda Industrial University, Kazakhstan, Temirtau

²Satbayev University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: gritsenko_lv@mail.ru

Effect of the morphology of zinc oxide layers on the electrochemical properties of biosensors

Diabetes mellitus, associated with insulin deficiency and high blood glucose, is one of the leading causes of death and disability in the world. Continuous monitoring of blood glucose levels can help prevent heart disease, kidney failure, or blindness. In this regard, fast, precise and economical identification of blood glucose levels is necessary. Therefore, the manufacture of an economical, easy-to-use, exact, portable and fast glucose biosensor is of critical importance in diabetes mellitus. Electrochemical biosensors for glucose identification are widely used. In this work, arrays of highly oriented ZnO nanorods synthesized by a low-cost method of chemical deposition from solution was used as an amperometric enzymatic electrode in which glucose oxidase (GOx) was immobilized by physical adsorption. The morphology, optical and electrochemical properties of the fabricated modified ITO/ZnO/GOx/Nafion electrode were studied. The influence of the morphology of zinc oxide layers on the activity of the enzyme and biosensor was investigated. The resulting modified ITO/ZnO/GOx/Nafion electrodes with arrays of ordered thin ZnO nanorods showed a high sensitivity of $\sim 50 \mu\text{A/mM}\cdot\text{cm}^2$ for the detection of glucose in solution, i.e. ZnO nanorods with a high specific surface area are an excellent platform for the immobilization of glucose oxidase in biosensors.

Key words: zinc oxide, electrochemical properties, biosensor, glucose.

Д.Б. Толубаева¹, Л.В. Гриценко^{2*}

¹Қарағанды индустриялық университеті, Қазақстан, Теміртау қ.

²Satbayev University, Қазақстан, Алматы қ.

*email: gritsenko_lv@mail.ru

Биосенсорлардың электрохимиялық қасиеттерінің мырыш оксиді қабаттарының морфологиясына тәуелділігі

Инсулин тапшылығы мен қандағы глюкозаның жоғары концентрациясына байланысты қант диабеті – әлемде өлім мен мүгедектіктің негізгі себептерінің бірі. Қандағы глюкоза деңгейін үздіксіз бақылау жүрек ауруының, бүйрек жеткіліксіздігінің, немесе зағиптылықтың алдын алады. Осыған байланысты қандағы глюкоза деңгейін тез, дәл және үнемді анықтау қажет. Сондықтан қант диабетінде глюкозаны анықтауға арналған үнемді, қолдануға оңай, дәл, портативті және жылдам биосенсор жасау өте маңызды. Глюкозаны анықтау үшін электрохимиялық биосенсорлар кеңінен таралған. Бұл жұмыста төмен шығынды ерітіндіден химиялық тұндыру әдісімен алынған жоғары бағытталған ZnO нанобіліктерінің массиві физикалық адсорбция арқылы глюкозооксидаза (GOx) иммобилизацияланған амперометриялық ферментативті электрод ретінде пайдаланылды. Модификацияланған ITO / ZnO / GOx / Нафион электродының морфологиясы, оптикалық және электрохимиялық қасиеттері сараланды. Мырыш оксиді қабаттары морфологиясының фермент пен биосенсордың белсенділігіне әсері зерттелді. ZnO бағытталған жұқа нанобіліктерінің массиві бар модификацияланған ITO/ZnO/GOx/Нафион электродтары ерітіндіде глюкоза анықталғанда $\sim 50 \text{ мкА/мM см}^2$ мәнінде өте жоғары сезімталдылық көрсетті, яғни бетінің меншікті ауданы жоғары ZnO нанобіліктері биосенсорлардағы глюкозооксидазаны иммобилизациялауға арналған тамаша платформа.

Түйін сөздер: мырыш оксиді, электрохимиялық қасиеттері, биосенсор, глюкоза.

Введение

Сахарный диабет, связанный с дефицитом инсулина и высокой концентрацией глюкозы в крови, является одной из основных причин смерти и инвалидности в мире. Непрерывный мониторинг уровня глюкозы в крови позволяет предотвратить болезни сердца, почечную недостаточность или слепоту. В связи с этим необходима быстрая, точная и экономичная идентификация уровня глюкозы в крови. Поэтому изготовление экономичного, простого в использовании, точного, портативного и быстрого биосенсора для определения глюкозы имеет решающее значение при сахарном диабете. Широкое распространение получили электрохимические биосенсоры для идентификации глюкозы. В данной работе массивы высокоориентированных наностержней ZnO, полученных низкозатратным методом химического осаждения из раствора, были использованы в качестве амперометрического ферментативного электрода, в котором глюкозооксидаза (GOx) была иммобилизована посредством физической адсорбции. Исследованы морфология, оптические и электрохимические свойства изготовленного модифицированного электрода ITO/ZnO/GOx/Нафион. Изучено влияние морфологии слоёв оксида цинка на активность

ферmenta и биосенсора. Полученные модифицированные электроды ITO/ZnO/GOx/Нафион с массивами упорядоченных тонких наностержней ZnO показали высокую чувствительность $\sim 50 \text{ мкА/мM см}^2$ при обнаружении глюкозы в растворе, т.е. наностержни ZnO с высокой удельной площадью поверхности являются прекрасной платформой для иммобилизации глюкозооксидазы в биосенсорах.

Биосенсоры для определения уровня сахара в крови имеют широкое промышленное, экологическое и медицинское применение с целью диагностирования и лечения диабета [1]. Сахарный диабет – это метаболическое заболевание, которое вызывает аномальный уровень сахара в крови. На текущий момент эта болезнь пока неизлечима и является одной из основных причин человеческой смертности и инвалидности в мире. При данном виде заболевания происходит нарушение обмена веществ, которое связано с дефицитом инсулина в организме. Кроме того, следствием сахарного диабета является почечная недостаточность, ишемическая болезнь сердца, заболевания сосудов, слепота, нарушение мозгового кровообращения и другие заболевания. Следовательно, пациентам, страдающим диабетом, необходимо постоянно контролировать уровень глюкозы в крови, чтобы избежать осложнений. Таким образом, создание точных,

простых в использовании, экономичных сенсоров для обнаружения глюкозы в крови является актуальной задачей. Развитие биосенсоров позволило получить значительные результаты в области биологии, физики, химии. Одним из перспективных видов сенсоров являются электрохимические биосенсоры, позволяющие определять уровень глюкозы в крови [2, 3].

К электрохимическим методам относятся амперометрический, вольтамперометрический, калориметрический методы. Существуют различные способы иммобилизации фермента глюкозооксидазы, такие как полимеризация, инкапсуляция, асимиляция и др. Активно используются неферментативное и ферментативное биосенсорное определение глюкозы [4 - 6].

При электрохимическом исследовании распознавание между ферментом и субстратом обеспечивает высокую селективность ферментного датчика и низкий предел обнаружения. Электрохимические биосенсоры на основе глюкозооксидазы (GOx) являются предпочтительными устройствами для определения уровня глюкозы в крови ввиду их простоты, селективности, высокой чувствительности и точности [7]. Однако на активность фермента оказывают значительное влияние внешние факторы окружающей среды, такие как уровень pH, токсичность материала, температура, что сказывается на стабильности фермента. Кроме того, остаются проблемы с использованием биосенсоров глюкозы на основе ферментов из-за низкой эффективности иммобилизации ферментов на твёрдотельном электроде. Для решения данной проблемы многие исследователи применяют наноструктурированные материалы.

Оксид цинка (ZnO) является перспективным полупроводниковым материалом, используемым для изготовления электрохимических биосенсоров глюкозы ввиду его биосовместимости и таких уникальных свойств, как низкая токсичность, высокая подвижность носителей и простота получения [8, 9]. ZnO обладает ИЭП ~9,5, что подходит для адсорбции ферментов с низкой ИЭП, особенно GOx (ИЭП: ~4,2–4,5), при физиологическом pH=7,4 за счёт электростатического притяжения [10]. Окислительно-восстановительная способность фермента всегда затруднена, когда окислительно-восстановительный центр изолирован. Следовательно, перенос электрона не происходит напрямую, если нет окислительно-восстановительного потенциала. В этом случае применяется медиатор. Однако использование

ZnO обеспечивает прямой перенос электронов без использования окислительно-восстановительного медиатора, так как электрод и фермент работают в небольшом окне потенциалов близком к окислительно-восстановительному потенциалу самого фермента, тем самым снижая восприимчивость биосенсора к другим мешающим биомолекулам [11].

Биодатчики глюкозы на основе оксида цинка различной морфологии в виде наночастиц, нанолистов, нанолент и др. обладают необходимой поверхностью для иммобилизации ферментов, но демонстрируют относительно низкую стабильность, так как они легко отделяются от рабочего электрода во время функционализации [12].

Адгезия может быть улучшена за счёт выращивания наностержней непосредственно на подложках, а не путём переноса несвязанных наноструктур на подложки. Таким образом, структура наностержней ZnO идеальна для иммобилизации ферментов, поскольку она обеспечивает прямое и быстрый перенос электронов между основой электрода и ферментом [13]. Кроме того, наностержни, выращенные непосредственно на подложке, обеспечивают высокую стабильность, поскольку процесс является химически и механически надёжным.

Существуют различные методы синтеза наностержней ZnO: электролиз [14], гидротермальный метод [15], газофазный метод [16], осаждение из газовой фазы в присутствии металлоганических соединений [17], магнетронное распыление [18] и другие.

В данной работе наностержни ZnO были синтезированы низкозатратным низкотемпературным методом химического осаждения из раствора согласно методу, описанному в работе [19]. Исследованы морфология, структурные, фотолюминесцентные и биохимические свойства полученных образцов.

Экспериментальная часть

Образцы с наностержнями оксида цинка в качестве модифицированного электрода для обнаружения глюкозы были синтезированы на тщательно очищенных в растворе пиранья (25% раствор аммиака NH₄OH, 35 % перекись водорода, дистиллированная вода в соотношении 1:1:4) в течение 20 минут кипячения для создания гидрофильтрной поверхности стеклянных подложек 25 x 25 x 1.1 м, покрытых проводящим тонким слоем оксида олова (ITO, сопротивление 8-12 Ом/см²), толщина ITO слоя составила 120-

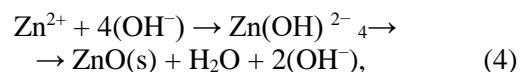
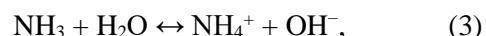
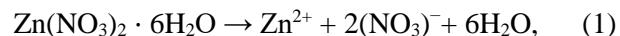
160 нм. Этот метод прост, экономичен, эффективен и подходит для получения высококачественного затравочного слоя ZnO при выращивании наноструктур. Стекло с ITO покрытием обладает хорошей проводимостью, химической стойкостью, при этом у него меньше себестоимость, чем у электродов из золота или стеклоуглерода. На первом этапе на подготовленные подложки был нанесён затравочный слой ZnO согласно золь-гель технологии. Раствор золя содержал 0,4 г ацетата цинка $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ZnAc_2), растворённые в 10 мл этанола $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Равномерное распределение золя достигалось путём нанесения нескольких капель раствора на поверхность подготовленной подложки, закреплённой на горизонтальном столике, с последующим вращением столика со скоростью ~ 2000 об/мин в течение 5 минут. Затем подложки были высушены в сушильном шкафу при температуре 130°C в течение 20 минут. Последующий отжиг при температуре 450°C в течение 60 минут в муфельной печи приводил к формированию равномерного затравочного слоя на поверхности подложек.

На втором этапе методом химического осаждения из раствора (низкотемпературным гидротермальным методом) осуществлялся ориентированный рост наностержней ZnO. Раствор роста содержал смеси водных растворов нитрата цинка $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 75 mM и гексаметилентетрамина (НМТА) $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ 75 mM. Синтез проводился в течение двух часов при температуре 90°C на магнитной мешалке с подогревом в стеклянном стакане на водяной бане.

Подложки с затравочным слоем крепились под небольшим углом к стенкам стакана, обращённые тыльной стороной в его центр. Стакан с рабочим раствором и с образцами герметично закрывался. По окончанию синтеза образцы вынимались, промывались дистилированной водой и высушивались в сушильном шкафу в течение 30 минут при температуре 115°C .

Существует предположение, что при этом происходят следующие химические превращения между нитратом цинка $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ и уротропином НМТА [20]:



В ходе данного синтеза ионы гидроксида образовываются посредством разложения НМТА, и затем реагируют с Zn^{2+} , образуя тем самым наностержни ZnO на поверхностях затравочного слоя на подложке.

Результаты и обсуждение

Морфология полученных образцов была исследована на многофункциональном электронном растровом микроскопе Quanta 200i 3D (FEI Company) с интегрированными системами фокусированного ионного пучка, энерго-дисперсионного спектрометра и кристаллографического анализа для диагностики и исследований различных материалов. Результаты исследования электронной сканирующей микроскопии (рисунки 1 и 2) показали, что полученные слои ZnO являются однородными по всей поверхности.

Наностержни растут ориентированными перпендикулярно поверхности подложки. При концентрации ацетата цинка 75 mM формируются отдельно стоящие стержни диаметром ~ 60 нм (рисунок 1), при концентрации ацетата цинка 0,3M диаметр стержней увеличивается до 200–250 нм, образуя тонкую однородную плёнку (рисунок 2).

Исследование оптических свойств синтезированных образцов ZnO на двухлучевом UV/Vis спектрофотометре Lambda 35 (PerkinElmer) показало, что все полученные образцы являются однородными, прозрачными в видимой области спектра с пропусканием 80–90% (рисунки 3 и 4).

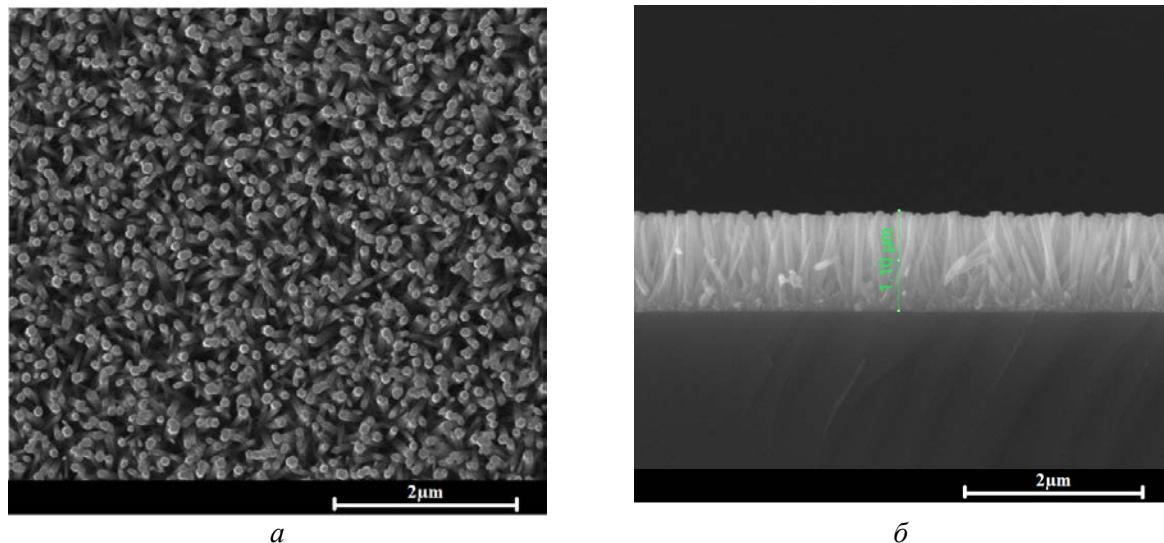


Рисунок 1 – Морфология образца ZnO, синтезированного в течение 2 часов при концентрации ацетата цинка в растворе 75ММ; *а* – вид сверху, *б* – вид сбоку

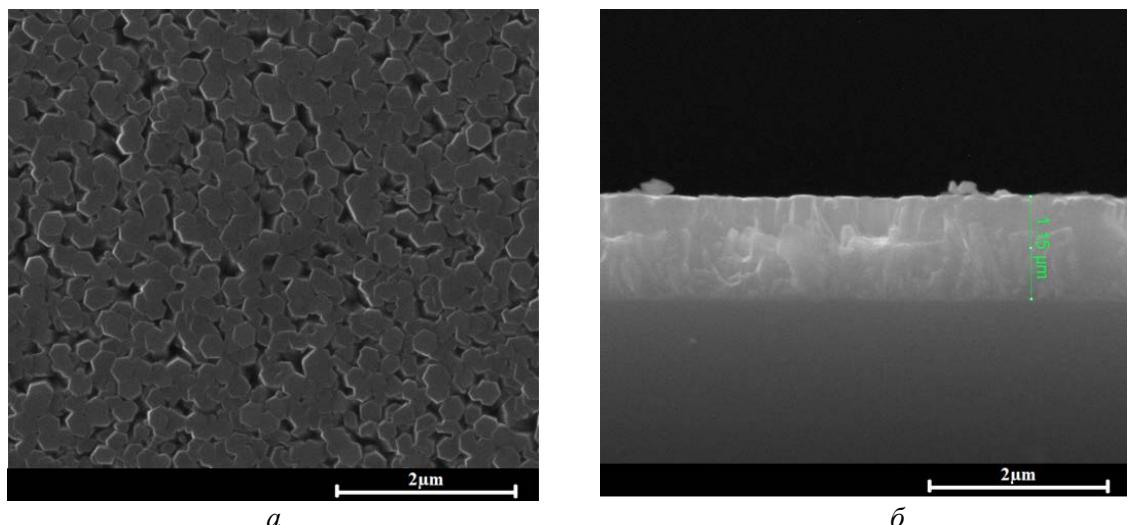


Рисунок 2 – Морфология образца ZnO, синтезированного в течение 2 часов при концентрации ацетата цинка в растворе 0,3М; *а* – вид сверху, *б* – вид сбоку

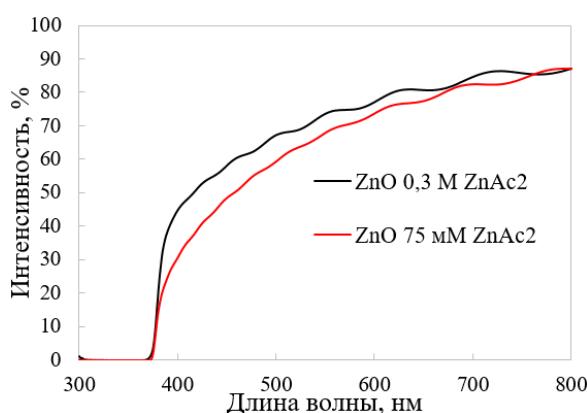


Рисунок 3 – Спектры пропускания наностержней ZnO

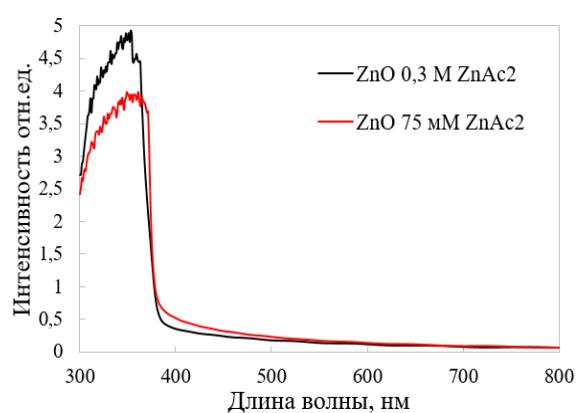


Рисунок 4 – Спектры оптической плотности наностержней ZnO

На основании спектров оптической плотности можно рассчитать ширину запрещённой зоны из соответствия частотной зависимости коэффициента поглощения формуле Тауца [21] и оценке соответствующего энергетического параметра, называемого краем Тауца или оптической щелью (E_g). Соотношение Тауца для прямозонных полупроводниковых материалов даётся выражением

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n, \quad (6)$$

где α – коэффициент поглощения, $h\nu$ – энергия фотона, A – коэффициент пропорциональности. Так как ZnO является широкозонным материалом, то n равно 0.5. Выражение для коэффициента пропорциональности имеет вид

$$A = \alpha d = -\ln T, \quad (7)$$

где d является толщиной плёнки, а T – коэффициент пропускания. На рисунке 5 представлена зависимость $(\alpha E)^2$ от $E(h\nu)$, где α является коэффициентом поглощения, $h\nu$ – энергия фотона. Прямая линия на графике соответствует прямой области. Экстраполяция этой прямой к оси E даёт значение ширины запрещённой зоны.

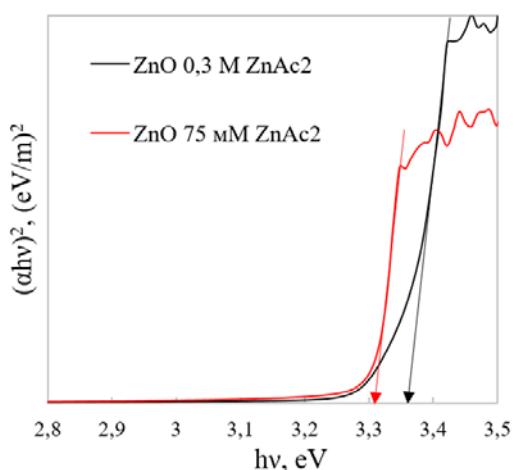


Рисунок 5 – Соотношение между $(\alpha h\nu)^2$ и $(h\nu)$ для синтезированных образцов ZnO

Изучение значений оптической ширины запрещённой зоны показывает, что при более высокой концентрации ацетата цинка в растворе роста (тонкие плёнки) ширина запрещённой зоны

образцов составляет 3,36 эВ, а при более низкой (отдельно стоящие стержни) – 3,31 эВ.

С целью изучения электрохимических свойств полученных образцов с перспективой их последующего использования в качестве электродов биосенсоров глюкозы была проведена иммобилизация глюкозооксидазы (GOx), обладающей низкой IEP (pI ~ 4,2–4,5) на поверхности синтезированных наностержней ZnO с высокой IEP (pI ~ 9,5) посредством физической адсорбции. Для этого синтезированные образцы оксида цинка были промыты буферным раствором (PBS, pH=6.8), что обеспечило наличие гидрофильной поверхности и последующей фиксации глюкозооксидазы (GOx). Затем на наностержни ZnO капнули 10 мкл раствора GOx и поместили на 16 часов в холодильник при температуре 4°C. Концентрация GOx составила 10 мг/мл. После тщательного промывания образцов для удаления подвижных остатков GOx на подложки с ZnO покапельно наносится 10 мкл 5% раствора Нафиона. Все модифицированные электроды хранили в сухом прохладном месте при температуре 4°C до дальнейшего использования.

Измерения электрохимических свойств проводили в трёхэлектродной электрохимической ячейке с использованием одноканального потенциостата-гальваностата Corrtest CS310 при комнатной температуре 20°C. Для проведения измерений хлорсеребряный электрод сравнения, электрод ITO/ZnO/GOx или ITO/ZnO/GOx/Nafion и вспомогательный электрод помещали в 0,01 М PBS (pH 6.8) и электрод.

Циклическая вольтамперометрия (CV) была использована для измерения отклика электродов ZnO в виде тонких плёнок и тонких наностержней в присутствии 3мМ глюкозы в 0,01 М фосфатно-буферном физиологическом растворе (PBS) для оценки сенсорных характеристик изготовленных электродов до и после иммобилизации GOx. На рисунках 6 и 7 приведены циклические вольтамперограммы двух типов электродов ZnO при скорости сканирования 50 мВ/с. В отсутствие GOx наблюдался относительно небольшой пик анодного тока при потенциале ~0,1 В. Полученные модифицированные электроды ITO/ZnO/Нафцион с массивами упорядоченных тонких наностержней ZnO показали высокую чувствительность ~50 мА/мM·см² при обнаружении глюкозы в растворе.

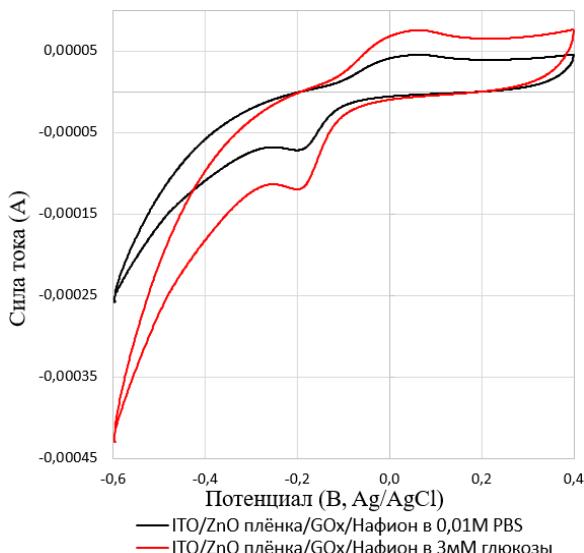


Рисунок 6 – Циклические вольтамперограммы модифицированного электрода с тонкой плёнкой ZnO

Таким образом, изготовленные электроды ITO/ZnO/GOx/Нафион могут быть использованы в качестве основы для биосенсоров глюкозы. Образцы с отдельно растущими наностержнями ZnO демонстрировали большую чувствительность, чем образцы со стержнями, образующими тонкую плёнку. Большая площадь поверхности отдельно растущих наностержней позволяет захватывать больше ферментов GOx, тем самым способствуя прямому переносу электронов (DET) между ферментами GOx и модифицированным электродом. Учитывая небольшое расстояние между морфологическими структурами наностержней и активными реакционными центрами фермента, электроны туннелировали через ZnO даже при низком рабочем потенциале.

Заключение

Экономичным методом химического осаждения из раствора синтезированы высокоориентированные слои оксида цинка в виде тонких плёнок и массивов наностержней на

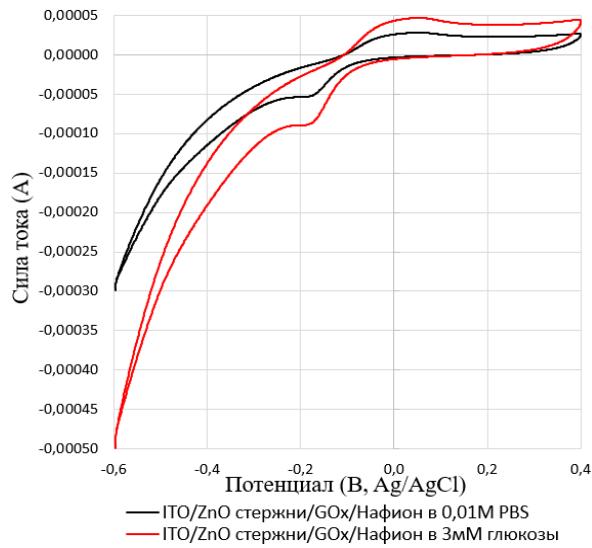


Рисунок 7 – Циклические вольтамперограммы модифицированного электрода с наностержнями ZnO

ITO подложках. Изучены оптические, структурные и биохимические свойства данных образцов. Наностержни ZnO продемонстрировали подходящую матрицу для иммобилизации GOx благодаря хорошему удерживанию ферментов. Был достигнут прямой перенос электронов между наностержнями GOx и ZnO, что привело к проявлению каталитических свойств по отношению к глюкозе. Изготовленные электроды ITO/ZnO/GOx/Нафион с массивами упорядоченных тонких наностержней ZnO показали высокую чувствительность $\sim 50 \text{ мА/мМ}\cdot\text{см}^2$ при обнаружении глюкозы в растворе ввиду большой рабочей поверхности, что позволяет рассматривать их в качестве основы для создания биосенсоров глюкозы.

Благодарности

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № АР08856173).

Литература

- Pullano S.A., Greco M., Bianco M.G., Foti D., Brunetti A., Fiorillo A.S. Glucose biosensors in clinical practice: principles, limits and perspectives of currently used devices // Theranostics. – 2022. – Vol. 12(2). – P. 493-511.
- Jayakumar K., Bennett R., Leech D. Electrochemical glucose biosensor based on an osmium redox polymer and glucose oxidase grafted to carbon nanotubes: A design-of-experiments optimisation of current density and stability // Electrochimica Acta. – 2021. – Vol. 371. – P. 137845.
- Haghparas Z., Kordrostami Z., Sorouri M., Rajabzadeh M., Khalifeh R. Highly sensitive non-enzymatic electrochemical glucose sensor based on dumbbell-shaped double-shelled hollow nanoporous CuO/ZnO microstructures // Sci. Rep. – 2021. – Vol. 11. – P. 344.

4. Arif D., Hussain Z., Sohail M., Liaqat M.A., Khan M.A., Noor T. A Non-enzymatic Electrochemical Sensor for Glucose Detection Based on Ag@TiO₂@ Metal-Organic Framework (ZIF-67) Nanocomposite // *Front. Chem.* – 2020. – Vol. 8. – P. 573510.
5. Hassan M.H., Vyas C., Grieve B., Bartolo P. Recent Advances in Enzymatic and Non-Enzymatic Electrochemical Glucose Sensing // *Sensors (Basel)*. – 2021. – Vol. 21(14). – P. 4672.
6. Nakhaeki H., Mogharnasi M., Fanaei H. Effect of swimming training on levels of asprosin, lipid profile, glucose and insulin resistance in rats with metabolic syndrome // *Obesity Med.* – 2019. – Vol. 15. – P.100111.
7. Tang J., Wei L., He S., Li J., Nan D., Ma L., Shen W., Kang F., Lv R., Huang Z. A Highly Sensitive Electrochemical Glucose Sensor Based on Room Temperature Exfoliated Graphite-Derived Film Decorated with Dendritic Copper // *Materials*. – 2021. – Vol. 14 (17). – P. 5067.
8. Kedruk Y.Y., Baigarinova G.A., Gritsenko L.V., Cicero G., Abdullin Kh. A. Facile Low-Cost Synthesis of Highly Photocatalytically Active Zinc Oxide Powders // *Frontiers in Materials*. – 2022. – Vol. 9. – P. 1-11.
9. Maraeva E.V., Permiakov N.V., Kedruk Y.Y., Gritsenko L.V., Abdullin Kh.A. Creating a virtual device for processing the results of sorption measurements in the study of zinc oxide nanorods // *Chimica Techno Acta*. – 2020. – Vol. 7, №4. - P. 154-158.
10. Aydoğdu G., Zeybek D.K., Pekyardımcı Ş., Kılıç E. A novel amperometric biosensor based on ZnO nanoparticles-modified carbon paste electrode for determination of glucose in human serum // *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.* – 2013. – Vol. 41 (5). – P. 332–338.
11. Arya S.K., Saha S., Ramirez-Vick J.E., Gupta V., Bhansali Sh., Singh S.P. Recent advances in ZnO nanostructures and thin films for biosensor applications: Review // *Anal. Chim. Acta*. – 2012. – Vol. 737. – P. 1–21.
12. Bagyalakshmi S., Sivakami A., Balamurugan K.S. A ZnO nanorods based enzymatic glucose biosensor by immobilization of glucose oxidase on a chitosan film // *Obesity Medicine*. – 2020. – Vol. 18. – P. 100229.
13. Zhai Y., Zhai Sh., Chen G., Zhang K., Yue Q., Wang L., Liu J., Jia J. Effects of morphology of nanostructured ZnO on direct electrochemistry and biosensing properties of glucose oxidase // *J. Electroanal. Chem.* – 2011. – Vol. 656. – P. 198-205.
14. Saidi R., Ashrafizadeh F., Raeissi K., Kharaziha M. Electrochemical aspects of zinc oxide electrodeposition on Ti6Al4V alloy // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 402. – P. 126297.
15. Majid F., Bashir M., Bibi I., Raza A., Ezzine S., Alwadai N., Iqbal M. ZnO nanofibers fabrication by hydrothermal route and effect of reaction time on dielectric, structural and optical properties // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 18. – P. 4019-4029.
16. Jones A., Mistry K., Kao M., Shahin A., Yavuz M., Musselman K.P. In-situ spatial and temporal electrical characterization of ZnO thin films deposited by atmospheric pressure chemical vapour deposition on flexible polymer substrates // *Sci Rep.* – 2020. – Vol.10. – P.19947.
17. Wang J., He Y., Luo T.-Ch., Li Y., Zhou Zh., Fan B., Li J., Wang G. Simulation and experimental verification study on the process parameters of ZnO-MOCVD // *Ceramics International* – 2021. – Vol. 47, Issue 11. – P. 15471-15482.
18. Vasin A.V., Rusavsky A.V., Bortchagovsky E.G., Gomeniuk Y.V., Nikolenko A.S., Strelchuk V.V., Yatskiv R., Tiagulskyi S., Prucnal S., Skorupa W., Nazarov A.N. Methane as a novel doping precursor for deposition of highly conductive ZnO thin films by magnetron sputtering // *Vacuum*. – 2020. – Vol. 174. – P.109199.
19. Abdullin Kh.A., Gabdullin M.T., Gritsenko L.V., Ismailov D.V., Kalkozova Zh.K., Kumekov S.E., Mukash Zh.O., Sazonov A.Yu., and Terukov E.I., Electrical, Optical, and Photoluminescence Properties of ZnO Films Subjected to Thermal Annealing and Treatment in Hydrogen Plasma // *Semiconductors*. – 2016. – Vol.50 (8). – P. 1010-1014.
20. Kurudirek S.V., Pradel K.C., Summers C.J. Low-temperature hydrothermally grown 100 μm vertically well-aligned ultralong and ultradense ZnO nanorod arrays with improved PL property // *J. Alloys Compd.* – 2017. – Vol. 702. – P. 700-709.
21. Rusdi R., Rahman A.A., Mohamed N.S., Kamarudin N., Kamarulzaman N. Preparation and Band gap Energies of ZnO Nanotubes, Nanorods and Spherical Nanostructures // *Powder Technol.* – 2011. – Vol. 210. – P. 18-22.

References

1. S.A. Pullano, M. Greco, M.G. Bianco, D. Foti, A. Brunetti, A.S. Fiorillo, Theranostics, 12 (2), 493-511 (2022).
2. K. Jayakumar, R. Bennett, D. Leech, *Electrochimica Acta*, 371, P.137845 (2021).
3. Z. Haghparas, Z. Kordrostami, M. Sorouri, M. Rajabzadeh, R. Khalifeh, *Sci. Rep.*, 11, 344 (2021).
4. D. Arif, Z. Hussain, M. Sohail, M.A. Liaqat, M.A. Khan, T. Noor, *Front. Chem.*, 8, 573510 (2020).
5. M.H. Hassan, C. Vyas, B. Grieve, P. Bartolo, *Sensors (Basel)*, 21 (14), 4672 (2021).
6. H. Nakhaeki, M. Mogharnasi, H. Fanaei, *Obesity Med.*, 15, 100111 (2019).
7. J. Tang, L. Wei, S. He, J. Li, D. Nan, L. Ma, W. Shen, F. Kang, R. Lv, Z. Huang, *Materials*, 14 (17), 5067 (2021).
8. Y.Y. Kedruk, G.A. Baigarinova, L.V. Gritsenko, G. Cicero, Kh. A Abdullin, *Frontiers in Materials*, 9, 1-11 (2022).
9. E.V. Maraeva, N.V. Permiakov, Y.Y. Kedruk, L.V. Gritsenko, Kh.A. Abdullin, *Chimica Techno Acta*, 7 (4), 154-158 (2020).
10. G. Aydoğdu, D.K. Zeybek, Ş. Pekyardımcı, E.Kılıç, *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 41 (5), 332-338 (2013).
11. S.K. Arya, S. Saha, J.E. Ramirez-Vick, V. Gupta, Sh. Bhansali, S.P. Singh, *Anal. Chim. Acta*, 737, 1-21 (2012).

12. S. Bagyalakshmi, A. Sivakami, K.S. Balamurugan, Obesity Medicine, 18, P. 100229 (2020).
13. Y. Zhai, Sh. Zhai, G. Chen, K. Zhang, Q. Yue, L. Wang, J. Liu, J. Jia, J. Electroanal. Chem., 656, 198-205 (2011).
14. R. Saidi, F. Ashrafizadeh, K. Raeissi, M. Kharaziha, Surface and Coatings Technology, 402, P. 126297 (2020).
15. F. Majid, M. Bashir, I. Bibi, A. Raza, S. Ezzine, N. Alwadai, M. Iqbal, Journal of Materials Research and Technology, 18, 4019-4029 (2022).
16. A. Jones, K. Mistry, M. Kao, A. Shahin, M. Yavuz, K.P. Musselman, Sci Rep., 10, P. 19947 (2020).
17. J. Wang, Y. He, T.-Ch. Luo, Y. Li, Zh. Zhou, B. Fan, J. Li, G. Wang, Ceramics International, 47, 15471-15482 (2021).
18. A.V. Vasin, A.V. Rusavsky, E.G. Bortchagovsky, Y.V. Gomeniuk, A.S. Nikolenko, V.V. Strelchuk, R. Yatskiv, S. Tiagulskyi, S. Prucnal, W. Skorupa, A.N. Nazarov, Vacuum, 174, P.109199 (2020).
19. Kh.A. Abdullin, M.T. Gabdullin, L.V. Gritsenko, D.V. Ismailov, Zh.K. Kalkozova, S.E. Kumekov, Zh.O. Mukash, A. Yu. Sazonov, and E.I. Terukov, Semiconductors, 50 (8), 1010-1014 (2016).
20. S.V. Kurudirek, K.C. Pradel, C.J. Summers, J. Alloys Compd., 702, 700–709 (2017).
21. R. Rusdi, A.A. Rahman, N.S. Mohamed, N. Kamarudin, N. Kamarulzaman, Powder Technol., 210, 18-22 (2011).

IRSTI 29.19.16

<https://doi.org/10.26577/RCPh.2022.v83.i4.05>

U.P. Suiinzhanova , A.U. Aldiyarov , K.I. Beisenov* 
 Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty
 *e-mail: khasen.007@gmail.com

STUDY OF GLASSY STATES OF CRYOCONDENSATES OF ORGANIC MOLECULES

Cryovacuum gas condensates, especially those prone to the formation of glassy states with their subsequent transformations, are ideal objects for studying the processes occurring in disordered amorphous solid-state systems. The fact that it is possible to precisely control the conditions of cryo-deposition, such as the condensation temperature and the rate of cryo-film formation, makes it possible to establish an unambiguous correlation between the properties of cryo-condensates and the specified conditions for their formation. Ultrastable glasses (predominantly from the vapor phase under optimal deposition conditions) are a unique class of materials with low enthalpies and high kinetic stability. These highly stable and dense glasses have unique physicochemical properties, such as high thermal stability, improved mechanical properties, or anomalous supercooled transitions. At $T = 70$ K, the transition from the amorphous glassy state (GS) to the liquid-solid cooled phase (SCL) occurs, after which its crystallization in the temperature range of 75-78 K passes into the plastic crystalline state (PC)-a cubic volume-centered structure with a directionally unregulated rotating subsystem. At $T = 78-80$ K, the transformation of the plastic crystal into a monoclinic crystal (MC) begins, which ends at $T = 83$ K.

Key words: ultrastable glasses, organic glasses, metallic glasses, Freon, crystallization, cryovacuum condensates.

Ұ.П. Сүйінжанова, А.У. Алдияров, Х.И. Бейсенов*
 Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.
 *email: khasen.007@gmail.com

Органикалық молекулалар криоконденсаттарының шыны құйлерін зерттеу

Криовакуумдық газ конденсаттар, әсіреле олардың кейінгі түрленуімен шыны құйлерінің түзілуіне бейім, ретсіз аморфты қатты дене жүйелерінде жүретін процестерді зерттеу үшін тамаша объектілер. Конденсация температуры мен криоқабықша түзілу жылдамдығы сияқты крио тұндыру жағдайларын дәл бақылау мүмкіндігі криоконденсаттардың қасиеттері мен олардың түзілуінің берілген шарттары арасында бір мәнді корреляцияны орнатуға мүмкіндік береді. Ультратұрақты шыны – (оңтайлы тұндыру жағдайында негізінен бу фазасынан алынған) төмен әнтальпиялары және жоғары кинетикалық тұрақтылығы бар материалдардың бірегей класы. Бұл өте тұрақты және тығыз шынылардың жоғары термиялық тұрақтылығы, жақсартылған механикалық қасиеттері немесе қалыптан тыс өте салқындытылған ауысулар сияқты бірегей физикалық және химиялық қасиеттері бар. $T = 70$ K шамасында аморфты шыны тәрізді (АШ) күйден сүйік-қатты салқындытылған (СҚС) күйге өту жүреді, содан кейін оның 75-78 K температура диапазонында кристалдануы пластикалық-кристалды (КПК) күйге өтеді, бұл – бағытталған-реттелмейтін айналмалы ішкі жүйесі бар текше денеге бағытталған құрылым. $T = 78-80$ K кезінде пластикалық кристалдануы моноклинікалық кристалға (МК) айналуы басталады, ол $T = 83$ K болғанда аяқталады.

Түйін сөздер: ультратұрақты шынылар, органикалық шынылар, металл шынылар, фреон, кристалдану, криовакуум конденсаттары.

У.П. Суюнжанова, А.У. Алдияров, Х.И. Бейсенов*
 Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы
 *e-mail: khasen.007@gmail.com

Исследование стеклообразных состояний криоконденсаторов органических молекул

Криовакуумные газовые конденсаты, особенно склонные к образованию стеклообразных состояний с последующими их превращениями, являются идеальными объектами для изучения

процессов, происходящих в неупорядоченных аморфных твердотельных системах. Возможность точного регулирования условий криоосаждения, таких как температура конденсации и скорость образования криопленки, позволяет установить однозначную корреляцию между свойствами криоконденсатов и заданными условиями их формирования. Ультрастабильные стекла (преимущественно из паровой фазы при оптимальных условиях осаждения) представляют собой уникальный класс материалов с низкими энталпиями и высокой кинетической стабильностью. Эти высокостабильные и плотные стекла обладают уникальными физико-химическими свойствами, такими, как высокая термическая стабильность, улучшенные механические свойства или аномальные переохлажденные переходы. При $T = 70$ К происходит переход из аморфного стеклообразного состояния (АС) в жидкотвердое охлажденное состояние (ЖТОС), после чего его кристаллизация в интервале температур 75–78 К переходит в пластично-кристаллическое состояние (ПК) – кубическую объемно-центрированную структуру с направленно-нерегулируемой вращающейся подсистемой. При $T = 78$ –80 К начинается превращение пластического кристалла в моноклинный кристалл (МК), которое заканчивается при $T = 83$ К.

Ключевые слова: ультрастабильные стекла, органические стекла, металлические стекла, фреон, кристаллизация, криовакуумные конденсаты.

Introduction

Since their discovery in 2007 by Mark Ediger and his group at the University of Wisconsin [1] at Madison, stable vapor-deposited glasses have become an important area of research in the glass community due to their remarkable properties that are facilitating new approaches to the investigation of some long-standing problems in glass science, such as the phenomenology of glass transitions and the existence or absence of ideal glass obscured by kinetic glass transitions observed in the laboratory. At the same time, vapor phase deposition offers a versatile method for the production of organic thin-film glasses with improved kinetic and thermodynamic stability, as well as an adapted molecular orientation, opening up new possibilities for increasing the efficiency and service life of organic optoelectronic devices. In a broad sense, glasses can be defined as non-equilibrium solids devoid of long-range order [2]. The lack of periodicity gives these materials exceptional properties. In particular, they can be made more uniform on a larger scale than crystals due to the absence of grain boundaries, and there is great flexibility in tuning their composition and properties without entering well-defined thermodynamic states. They demonstrate a reversible transition between glass and a supercooled liquid, called a glass transition. Therefore, a good understanding of the dynamic behavior of supercooled liquids is critical to an accurate understanding of glass formation. We refer the reader to several reviews devoted to the supercooled liquid state [3], here we briefly present some ideas that we consider important for further discussion.

Glass is usually made by cooling a liquid above the melting point of the material, bypassing

crystallization, to low temperature regions where the viscosity is high enough to consider the material to be solid on observable time scales [4]. In the glass state, molecular motion almost ceases, except for thermal vibrations. A similar statement can be formulated in terms of structural relaxation time τ (also called alpha relaxation), taking into account the Maxwell equation [5], which relates the relaxation time of a supercooled liquid and shear viscosity through $\tau = G_\infty \eta$, where G_∞ is the shear modulus measured at high frequency. The relaxation time of the liquid is proportional to the viscosity and approximately corresponds to the same dependence on temperature, since the change in G_∞ with temperature is much less abrupt than the change in viscosity. Therefore, like the viscosity, τ of the supercooled liquid increases sharply near the glass transition, although this dynamic change is not related to the structural change [6]. The relaxation time can be considered as a characteristic time associated with the restructuring of the system after it has undergone an external change and is out of equilibrium. This can also be related to the dissipation of spontaneous density fluctuations that arise in the liquid structure. Both characteristic times are related by the fluctuation-dissipation theorem. For example, when the temperature of a liquid drops by a small amount, its volume (or enthalpy) does not change immediately, but the process takes a certain time to reach equilibrium. This equilibration time (or relaxation time), which depends on temperature, determines the dynamics of such a change. The temperature at which the material relaxation time exceeds the standard laboratory time scales (conventionally chosen at about 100 s) is considered the standard glass transition temperature T_g (Fig. 1). This temperature marks the transition from a supercooled liquid to a glass state. The glass transition temperature can be determined in many

other alternative ways: for example, in calorimetric experiments, its value for a given substance is determined by the final heat capacity jump upon cooling from a liquid at a rate of -10 K/min (see Fig. 2) [8]. Throughout this review, by ordinary glass we mean glass cooled from a liquid at a rate of -10 deg/min, and its T_g is measured during cooling or subsequent heating at a rate of +10 deg/min. However, the temperature associated with atomic-molecular stopping depends on the thermal history of the material, that is, for example, on the rate of its cooling. The lower the cooling rate, the lower the glass transition temperature if crystallization can be avoided. In other words, glass can be made more stable (lower T_g on cooling) by simply reducing the cooling rate. Of course, in addition to the risk of crystallization, which is a hindrance to many families of glasses, there is a practical obstacle to this processing route, since, roughly speaking, glass production usually requires temperature deviations from the liquid state by tens/hundreds of degrees [7]. That is, cooling at a rate of 0.01 K/min per 100 K will require about 10 days. Further reduction by two orders of magnitude of the cooling rate to obtain glass with higher thermodynamic stability (lower T_g) will increase this number to 3 years.

The amount of increase in stability as the cooling rate decreases will ultimately depend on the brittleness of the supercooled liquid. Kinetic brittleness is a measure of the non-Arrhenius behavior of the change in viscosity (or relaxation time) of a supercooled liquid as it approaches the glass transition temperature. Strong liquids exhibit an Arrhenius temperature dependence, while brittle liquids are strongly non-Arrhenius [9]. The greater the deviation from Arrhenius, the greater the brittleness, as shown schematically in Fig. 1b. At this point, we introduce the potential energy landscape (PEL) paradigm that is so widely used to visualize and discuss the dynamic and thermodynamic behavior of glasses and viscous fluids. As shown in Fig. 3, the PEL of an ensemble of N particles is essentially a topographic projection ($3N + 1$) of the potential energy hypersurface of any glass-forming substance, although it is schematically projected over two dimensions for convenience. Even a small part of this energy diagram is a set of local minima and saddle points for thermal energies below kBT_m (where T_m is the melting point of the stable crystalline state when it exists [10]). When a liquid is supercooled, bypassing crystallization, to the glass transition temperature T_g , it becomes a glass, falling into one of many possible local minima or metastable states, depending on the subsequent thermal history.

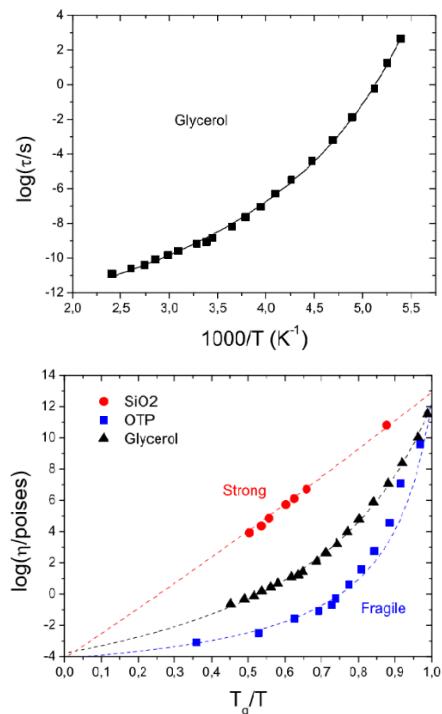


Figure 1 – Representation of the dynamics of typical glass-forming liquids: the logarithm of the structural (alpha) relaxation time of glycerol as a function of $1000/T$, showing an exponential increase in the relaxation dynamics with decreasing temperature, and the logarithm b of the dependence of viscosity on the normalized reciprocal temperature for materials with different brittleness. Tough materials such as silica follow the Arrhenius expression, while brittle glass formers such as o-terphenyl follow the super-Arrhenius expression.

Data obtained from [8]

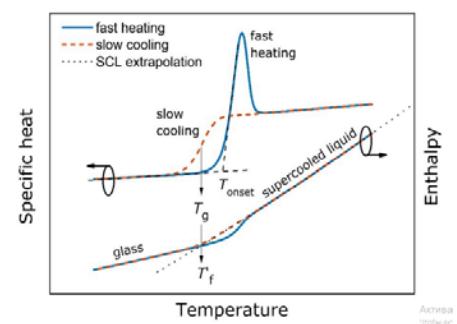


Figure 2 – Representation of a typical glass transition specific heat curve during cooling (red dotted line) and subsequent heating at a higher rate than during the previous cooling (blue line). The onset of the glass transition peak on heating corresponds to the initial temperature (T_{on}). Integrating the specific heat trace gives the enthalpy curve. The fictitious temperature limit can be calculated as the intersection of the enthalpy curve and the extrapolation of the enthalpy line of the supercooled liquid.

Many authors have speculated about the possible existence of an "ideal glass", which should correspond to the best and most stable glass possible, associated with the smallest relative minimum. This ideal glass would have to have zero configurational entropy, equal to the entropy of crystals, and was associated with the possible existence of an underlying thermodynamic glass transition, most likely of the second kind, occurring at the so-called Kauzman temperature T_K . Interestingly, several experiments in the last decade have addressed this issue more directly, attempting to penetrate very deeply into the energy landscape, approaching the ideal glass state, as shown in Fig. 3. The recent emergence of highly stable glasses has opened up new possibilities. an attractive and timely window for investigating these issues in the real world, not speculative way. From the point of view of PEL, kinetic stability can be considered as the height of the barriers that must be overcome in order to reach another, more balanced, metastable state. Therefore, thermodynamic stability is represented by a deep position in PEL. The lower the T_f value, the higher the stability of the glass, or in other words, the lower the position of the glass in the PEL [11].

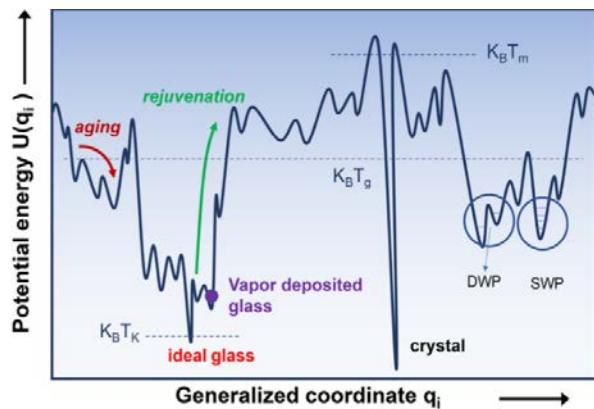


Figure 3 – Schematic potential energy landscape (PEL) for supercooled liquids and glasses, including a hypothetical absolute minimum for glass state. An ideal glass will be obtained after an infinitely long holding at the Kauzman temperature T_K .

Double-well (DWP) and single-well (SWP) potentials are also offered (see Section 4 for a detailed discussion). Glass can evolve through aging, exploring lower energy states, or through rejuvenation, moving to higher energy states. Ultrastable vapor-deposited glass can achieve low-energy states close to ideal glass.

Materials

Organic glasses. Most of the work on ultrastable glasses is related to molecular glasses. Since the first measurements in 2007 [12] with 1,3-bis(1-naphthyl)-5-(2-naphthyl)benzene (TNB) ($T_g = 347$ K) and indomethacin (IMC) ($T_g = 315$ K), over 45 different organic molecules, ranging from small molecules such as toluene and ethylbenzene to pharmaceuticals such as IMC and TNB, and more recently to organic semiconductors such as TPD, NPD, and TPBi. Have shown their ability to form highly stable glasses when grown by physical vapor deposition under the right processing conditions. As a general rule, vapor-deposited organic glasses show a significant increase in T_{on} compared to conventional glass obtained by cooling a liquid at a rate of -10 K/min. T_{on} ranges approximately from 2 to 10% depending on the molecular system and growth conditions. The two most significant external parameters affecting the kinetic and thermodynamic stability of organic glasses deposited from the vapor phase are the substrate temperature during growth from vapor, T_{sub} , and the growth rate, g .

This deposition method can produce highly stable glasses at lower deposition temperatures compared to standard physical vapor deposition. Other external variables such as electric/magnetic fields or light during thin film growth may have some influence on the formation of stable glasses depending on the nature of the organic molecule. For example, organic molecules with large intrinsic electric dipole moments can be orientationally tuned by strong external electric fields while maintaining high thermodynamic stability. The presence of magnetic fields during deposition can also play a role in molecules containing magnetic atoms. Alternatively, illumination of the substrate during growth can affect the formation of semiconductor molecules with homo-lumo levels below the energy of the incident light [13]. Eventually, as T_{sub} decreases further, the orientation of the molecule becomes flatter (parallel to the substrate), see Fig. 5. These observations have been experimentally determined using variable angle spectroscopic ellipsometry, X-ray diffraction, infrared/UV spectroscopy, or absorption and confirmed by a number of simulations [14]. The extent to which molecular ordering and thermal stability are related is not well known, but several experiments indicate that the two properties are not correlated.

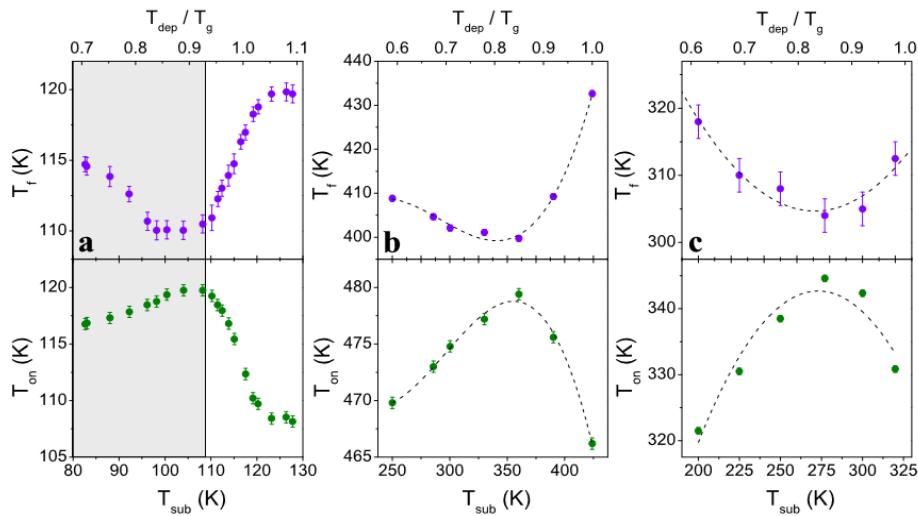


Figure 4 – Devitrification onset temperature (bottom) and fictitious temperature (top) of several organic thin films: Toluene; b Tris(4-carbazoyl-9-ylphenyl) amine (TCTA), c Celecoxib. The lines serve as a guide for the eyes. The devitrification was measured by quasiadiabatic membrane nanocalorimetry at heating rates on the order of 3×10^4 K/s for films of the same thickness.

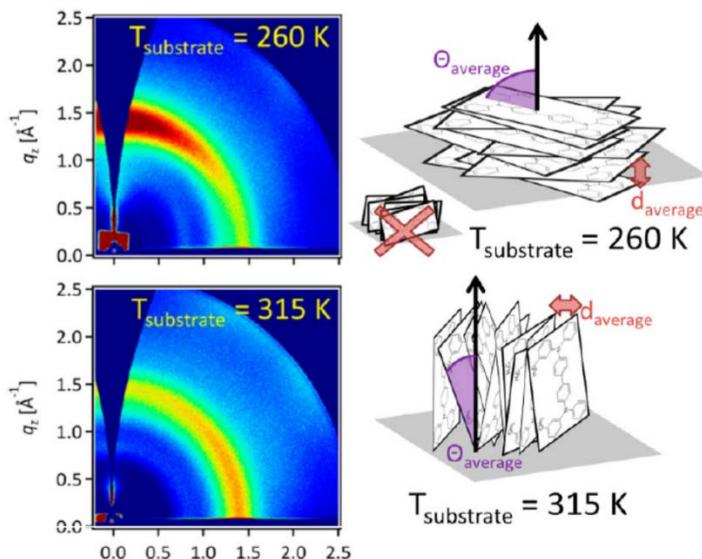


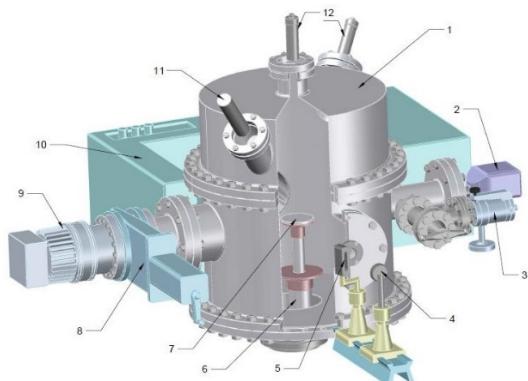
Figure 5 - (left) GIWAXS scattering patterns obtained from TPD glass vapors deposited at substrate temperatures of 260 K and 315 K. The intensity concentration observed along q_z and q_{xy} indicates anisotropic packing. These scattering patterns were obtained at an angle of incidence of 0.14° and reflect scattering from the entire thickness of the film. (Right) Diagram showing the microstructures of TPD glasses with the highest positive and negative order parameters in this study corresponding to the sample prepared at 260 K and 315 K. For illustrative purposes, the degree of order in the schemes is increased [15].

Experiment

Comprehensive studies were carried out on an experimental setup, which is a universal vacuum spectrophotometer, developed and created in the laboratory of cryophysics and cryotechnology of the Faculty of Physics and Technology. The technological parameters of the experimental setup make it possible to carry out measurements with an ultimate vacuum in the working chamber of the setup of 10^{-8} Torr, in the operating temperature range of

the cryosurface from 16 to 200 K, in the spectral range from 400 to 4200 cm^{-1} . The controlled thickness of the cryofilms was in the range from 0.25 to 25 μm . Figure 6 shows a scheme of a universal experimental setup, which was used to study the effect of polymorphic transformations in thin films of cryovacuum condensates of methane, methanol, ethanol, and freon 134a on optical characteristics, and also to determine the temperature limits for the existence of their structural-phase states. The universal experimental setup is a vacuum cryogenic

spectrophotometer, the main part of which is a vacuum chamber (1), 450 mm in diameter and height. The creation of vacuum in the chamber is carried out by a turbomolecular pump (9) Turbo-V-301, through a vacuum lock (8). The maximum vacuum value in the chamber reached $P = 10^{-8}$ Torr. Pressure measurement was carried out using a pressure transducer FRG-700 (2) connected to an AGC-100 controller. The main element of the chamber is a cryosurface (7) with a diameter of 60 mm and a height of 5 mm, which is installed on the upper flange of the microcryogenic machine (6) Gifford-McMahon. To ensure a sufficiently high thermal conductivity, the cryosurface was made of copper, and its polished surface was coated with a layer of silver to increase the reflectivity. Temperature measurements on the cryosurface were carried out with a thermal converter and a Lake Shore 325 controller. The mass of the injected gas condensed on the substrate was determined using a gas leak from a calibrated volume. The growth rate and film thickness were measured with a two-beam laser interferometer (wavelength 630 nm) using a P25a-SS-0-100 photomultiplier (12). The vibrational spectra of the resulting film were measured using an IKS-29 (10) IR spectrometer in the frequency range 400–4200 cm⁻¹.



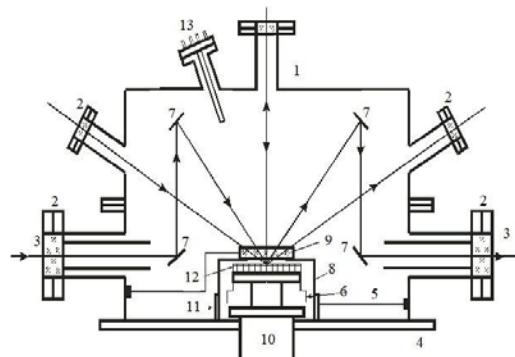
1 – vacuum chamber; 2 – pressure transducer;
3 – system of the studied gas; 4 – mirror reflector;
5 – IR source radiation; 6 – microcryogenic
machine; 7 – cryosurface; 8 – vacuum lock,
9 – turbomolecular pump; 10 – IR-spectrometer;
11 – laser; 12 – photomultiplier

Figure 6 – Scheme of the experimental setup

Description of the main elements of the vacuum chamber in the form of a diagram is shown in Fig. 7.

Overall dimensions of the base of the vacuum chamber (4): diameter 450 mm and thickness 35 mm. Calibration and installation work was carried out by opening the cover of the vacuum chamber. Optical windows (3) located in the camera body (1) are

designed to input the radiation of a two-beam laser interferometer. The light guides (7) of the two-beam laser interferometer provide different angles of incidence of the beam on the cryosurface. The studies were carried out in the IR range. A refrigerator (10) is located in the center of the chamber. Cutting off the working surface (12) from uncontrolled precondensation processes is carried out using a protective plate of potassium bromide (9). Additional copper plates are placed on the upper low-temperature flange of the microcryogenic machine, which play the role of cryocondensation pumps (6). There are holes in the protective casing (8) that allow the cryo-pumping process to be carried out using a cylindrical valve (11) and a magnetic drive (5), this allows increasing the vacuum level in the chamber[16].



1 – camera body; 2 – technological windows;
3 – optical window; 4 – base; 5 – magnetic drive;
6 – cryocondensation pump; 7 – mirror light guides;
8 – protective cover; 9 – plate; 10 – refrigerator;
11 – cylindrical valve; 12 – cryosurface;
13 – technological window

Figure 7 – Scheme of the vacuum chamber of the experimental setup

Overall dimensions of the base of the vacuum chamber (4): diameter 450 mm and thickness 35 mm. Calibration and installation work was carried out by opening the cover of the vacuum chamber. Optical windows (3) located in the camera body (1) are designed to input the radiation of a two-beam laser interferometer. The light guides (7) of the two-beam laser interferometer provide different angles of incidence of the beam on the cryosurface. The studies were carried out in the IR range. A refrigerator (10) is located in the center of the chamber. Cutting off the working surface (12) from uncontrolled precondensation processes is carried out using a protective plate of potassium bromide (9). Additional copper plates are placed on the upper low-temperature flange of the microcryogenic machine, which play the role of cryocondensation pumps (6).

There are holes in the protective casing (8) that allow the cryo-pumping process to be carried out using a cylindrical valve (11) and a magnetic drive (5), this allows increasing the vacuum level in the chamber[16].

Results and Discussion

The transformation of the vibrational spectra as the temperature changes, we can conclude that the cooling of the samples condensed at high temperatures also leads to a sharp change in the position and shape of the absorption bands corresponding to the characteristic frequencies of the methanol molecule. This fact especially clearly demonstrates the change in the shape and position of the band of libration oscillations. In this regard, we measured the thermogram of the cooling of the sample condensed at $T = 132$ K and then cooled to $T = 16$ K. The value $\nu = 715$ cm⁻¹ was chosen as the observation frequency. These data are shown below in Fig. 8. The right inset of the figure shows the spectra in the vicinity of this frequency, corresponding to the initial temperature $T = 132$ K and the final value $T = 16$ K.

As can be seen from Fig. 8, lowering the temperature of the sample leads to significant changes in the absorption spectrum. In this case, judging by the thermogram, these changes are carried out monotonically, however, at $T = 60$ K, a clear break is observed, which may indicate that at this temperature, a transition occurs between different states of the methanol cryofilm. allows us to conclude that a first-order phase transition may exist in this temperature range. The totality of the data obtained allows us to assume that in the studied temperature range there are several structural states of methanol and the corresponding structural transitions. In this case, the fact that we observed that changes in the vibrational spectra are observed with decreasing temperature allows us to conclude that a first-order phase transition may exist in this temperature range.

The left figure shows the change in reflectance at a wavelength of 406 nm for two angles of incidence of laser radiation (1,2) in comparison with the data of the IR thermogram (3) during heating of the methanol cryofilm. The right figure is a detailed fragment of the change in reflectivity in the vicinity of the glass transition temperature $T_g = 103$ K [17].

The currently available data of various authors do not allow unambiguous confirmation of this assumption, although a number of studies indicate the unique properties of solid methanol. Thus, it was shown in that the surface structure of a methanol cryofilm undergoes changes from the deposition temperature $T = 20$ K up to the glass transition

temperature $T_g = 103$ K. The reason for this is an increase in the diffusion activity of methanol molecules on the surface of cryocondensates with increasing temperature. Besides, it is noted that in the temperature range from 103 K to 118 K, crystallization processes occur in a supercooled liquid. In this regard, it seems interesting to compare our results in the IR range (thermogram) in the specified temperature range with the data on the change in the surface reflectivity of the sample at the wavelength of the laser radiation of the interferometer. These data for two angles of incidence of radiation $\alpha = 45^\circ$ and $\alpha = 90^\circ$ are shown in Fig. 9. It is assumed that structural transformations in the methanol cryofilm will affect the reflectivity of the surface and, as a result, the signal of the interferometers that detect the laser beam reflected from the surface will change. As can be seen from the results shown in Fig. 9, the data of the IR spectrometer and lasers are in good agreement with each other, confirming the existence of structural features in the temperature range of 16–30 K, in the vicinity of a temperature of 70–80 K, and also in the temperature range of 100–120 K. On the right The insert in Fig. 9 shows in more detail the change in the signals of laser interferometers in the temperature range from 103 to 115 K, which corresponds to the area of existence of a supercooled liquid. A sharp change in the nature of the reflection of laser radiation from the surface of the methanol cryocondensate confirms our conclusion that the value of the glass transition temperature is located in the vicinity of the temperature $T_g = 103$ K. In addition, the presence of a break in the dynamics of laser interferometer signals at a temperature of 105 K may indicate the existence of structural transformations in the sample at $T = 105$ K and $T = 115$ K, which is consistent with the data of [18]. We would also like to note the fact that we discovered the unusual behavior of the sample in the process of crystallization of the supercooled liquid phase. Earlier, we noted that we determined the temperature range in which this process occurs. It is the temperature range, and not its specific value. The reason for our assessment becomes clear from the analysis of the data shown in Figure 10. As can be seen from Fig. 10, the process of crystallization of the supercooled liquid phase of methanol occurs in a highly nonmonotonic manner, which is especially pronounced in the temperature range from 114 to 120 K. This may indicate a multi-stage process crystallization, when the formation of the subsequent state of methanol is limited by the formation of its previous state. This means that intermediate metastable states can exist between the liquid and crystalline phases of methanol in this temperature range [19].

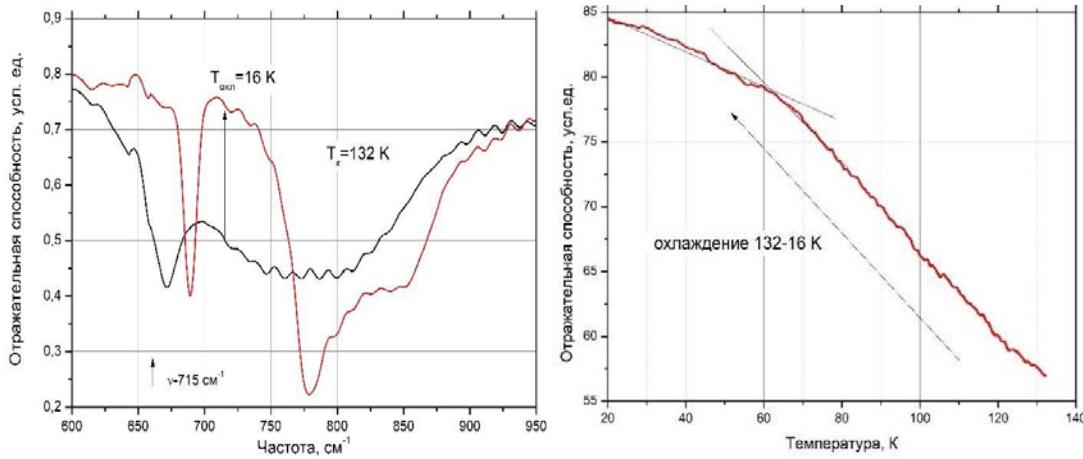


Figure 8 – Thermogram of cooling of a sample condensed at $T = 132\text{ K}$ and cooled to $T = 16\text{ K}$, observation frequency $\nu = 715\text{ cm}^{-1}$ (left), and comparison of the absorption spectra of a cryofilm condensed at $T_{dep} = 132\text{ K}$ and cooled to $T_{cool} = 16\text{ K}$ (right)

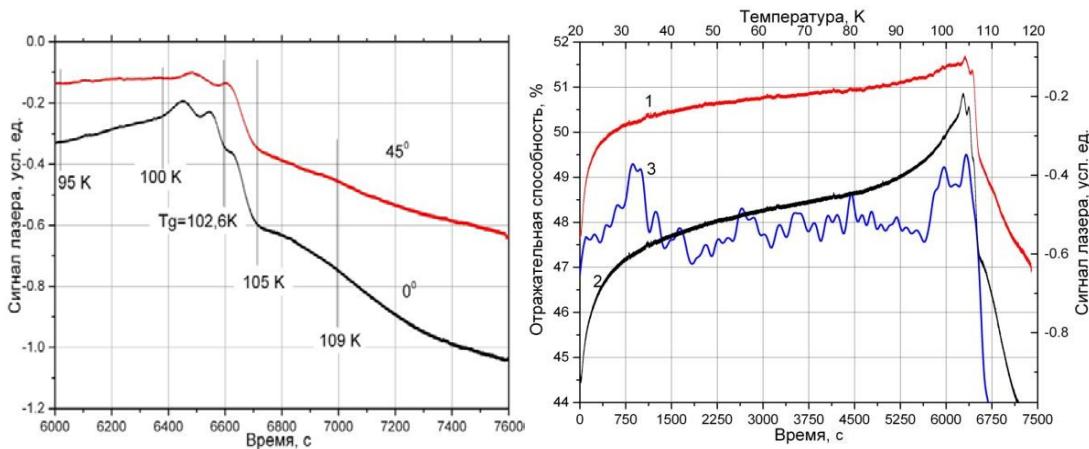
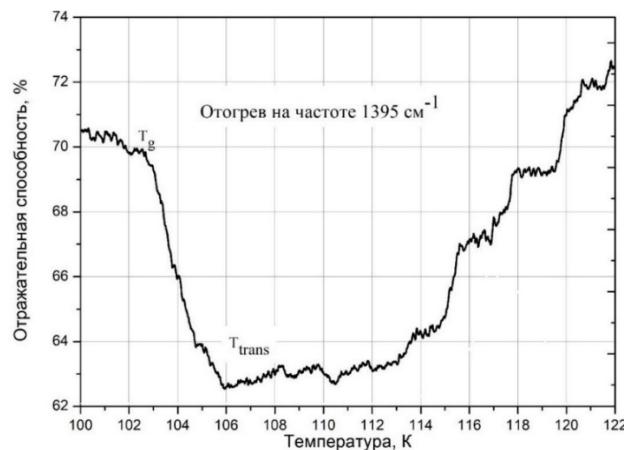


Figure 9 – Changes in the IR signal and laser in the vicinity of the glass transition temperature



T_g is glass transition temperature; T_{trans} is the transition temperature;

Figure 10 – Detailed representation of the thermogram of the heating of the methanol cryofilm in the temperature range of the existence of a supercooled liquid phase

Conclusions

At high densities and low enthalpies approaching "ideal glass", highly stable glasses exhibit unique liquefaction features such as the existence of a melt front in very thin films starting from high mobility regions located at surfaces/interfaces. Very thick (bulky) films have a glass transition resembling melting or crystallization by nucleation and growth. In this regard, there is still no understanding of the impact of stability in the mechanism of transformation. In addition, there are no detailed studies of the glass transition mechanism of ultrastable polymer and metallic glasses.

Based on the analysis of the results of measuring the IR spectra of methanol, the transition temperature from the glassy state (GS) to the state of supercooled liquid (SCL) was determined. In accordance with these results, the value of the glass transition temperature of methanol cryocondensates was determined to be $T_g = 102.6 \pm 0.2$ K, radiation $\lambda = 406$ nm. In addition, the temperature interval 103–118 K

for the existence of the SCL phase, as well as the interval 118–120 K, in which the SCL crystallization process is realized, was determined. Based on the data obtained, we determined the value of the glass transition temperature equal to $T_g = 102.6$ K, which is in agreement with the data of other authors. The range of temperatures for the existence of a supercooled liquid phase is determined in the range from 103 K to 118 K. We can assume that at a temperature of $T = 125$ K the sample is in a metastable state, and at a temperature of $T = 132$ K the cryofilm is in the α -phase. Cooling of cryocondensates formed at these temperatures leads to changes in the absorption spectra, which indicates structural transformations in them. In the general case, it can be said that at the same temperature, a sample of methanol cryocondensate can be in three different states, depending on the temperature history of its formation - direct condensation, heating from a low temperature state, or cooling from a higher condensation temperature.

References

- 1 Swallen S.F., Kearns K.L., Mapes M.K. Organic glasses with exceptional thermodynamic and kinetic stability // Science. – 2007. – Vol. 315. – P. 353–356.
- 2 Gonzalez L., Mo O., Yanez M. Density functional theory study on ethanol dimers and cyclic ethanol trimers // The Journal of Chemical Physics. – 2019. – Vol. 111. – P. 3855.
- 3 Ediger M.D., De Pablo J., Yu L. Anisotropic vapor-deposited glasses: hybrid organic solids. // Acc. Chem. Res. – 2019. – Vol 52. –P. 407–414.
- 4 Ediger M.D. Perspective:highly stable vapor – deposited glasses // J.Chem.Phys. – 2017. –Vol. 147. 210901.
- 5 Bagchi K., Ediger M.D. Controlling structure and properties of vapor-deposited glasses of organic semiconductors: recent advances and challenges // J. Phys. Chem. Lett. – 2020. – Vol.11. – P. 6935-6945.
- 6 Cavagna A. Supercooled liquids for pedestrians // Phys. Rep. – 2009. – Vol.476. – P.51-124.
- 7 Maxwell J.C. IV. On the dynamical theory of gases // Philos Trans R Soc London. – 2009. – Vol.157. – P.49-88.
- 8 Badrinarayanan P., Zheng W., Li Q., Simon S.L. The glass transition temperature versus the fictive temperature // J Non Cryst Solids. – 2007. – Vol. 353. – P. 2603-2612.
- 9 Mauro N.A., Blodgett M., Johnsonetal M.L. A structural signature of liquid fragility // Nat.Commun. – 2014. – Vol. 5. – P.4616.
- 10 Comez L., Masciovecchio C., Monaco G., Fioretto D. Progress in liquid and glass physics by Brillouin scattering spectroscopy // Solid State Physics. ed. by S. Sp. – 2012. – P.1-77.
- 11 Yokoyama D., Sakaguchi A., Suzuki M., Adachi C. Enhancement of electrontransport by horizontal molecular orientation of oxadiazole planar molecules in organic amorphous films // Appl Phys Lett. – 2009. –Vol. 95. – P.243.
- 12 Bagchi K., Jackson N.E., Gujraletal A. Origin of an isotropic molecular packing in vapor - deposited Alq3 glasses // J. Phys. Chem. Lett. – 2018. – Vol.10. – P.164–170.
- 13 Moynihan C.T., Lee S.K., Tatsumisago M., Minami T. Estimation of activation energies for structural relaxation and viscous flow from DTA and DSC experiments // Thermochim Acta. – 2016. – P.280-281.
- 14 Wolynes P.G. Spatiotemporal structures in aging and rejuvenating glasses // Proc Natl Acad Sci USA. – 2009. – Vol.106. – P.1353-1358.
- 15 Goldstein M. Viscous liquids and the glass transition: a potential energy barrier picture // J. Chem. Phys. – 2003. – Vol.51. – P. 3728.
- 16 Pogna E.A., Rodríguez-Tinoco C., Cerullo G. Probing equilibrium glass flow up to exapoise viscosities // Proc Natl Acad Sci USA. – 2015. – Vol.112. – P.2331–2336.
- 17 Pablo G. Debenedetti, Supercooled and glassy water // J. Phys. Condens.Matter. – 2003. – Vol. 15 (45). – P. 1669.
- 18 Pablo G., Frank H. Supercooled liquids and theglass transition Nature // J. Phys. Condens.Matter. – 2018. – Vol.410. – P. 259.

19 Chua Y., Tylinski Z.M., Tatsumi S., Ediger M. D., Schick C. Glasstransition and stable glass formation of tetrachloromethane // J. Chem. Phys. – 2016. – Vol.144. – P.244503.

References

- 1 S.F. Swallen, K.L Kearns, & M.K. Mapes, Science, 315, 353–356 (2007).
- 2 L. Gonzalez, O. Mo, & M. Yanez, The Journal of Chemical Physics, 111, 3855 (2019).
- 3 M.D. Ediger, J. De Pablo, L. Yu, Acc. Chem. Res, 52, 407–414 (2019).
- 4 M.D. Ediger, J.Chem.Phys, 147, 210901 (2017).
- 5 K. Bagchi, M.D. Ediger, J. Phys. Chem. Lett, 11, 6935–6945 (2020).
- 6 A. Cavagna, Phys. Rep, 476, 51–124 (2020).
- 7 J.C. Maxwell, Philos Trans R Soc London, 157, 49–88 (2007).
- 8 P. Badrinarayanan, W. Zheng, Q. Li, S.L. Simon, J Non Cryst Solids, 353, 2603–2612 (2007).
- 9 N.A. Mauro, M.Blodgett, M.L. Johnsonetal, Nat.Commun, 5, 4616 (2014).
- 10 L. Comez, C. Masciovecchio, G. Monaco, D. Fioretto, In Solid State Physics. ed. by S. Sp, 1–77. (2012).
- 11 D. Yokoyama, A. Sakaguchi, M. Suzuki, C. Adachi, Appl Phys Lett , 95, 243303 (2009).
- 12 K. Bagchi, N.E. Jackson, A. Gujraletal, J. Phys. Chem. Lett, 10, 164–170 (2018).
- 13 C.T. Moynihan, S.K. Lee, M. Tatsumisago, T. Minami, Thermochim Acta, 280–281 (2016).
- 14 P.G. Wolynes, Proc. Nat. Acad Sci USA, 106, 1353-1358 (2009).
- 15 M. Goldstein, J. Chem. Phys, 51, 3728 (2003).
- 16 E.A. Pogna, G. Rodríguez-Tinoco, Cerullo G. et al., Proc Natl Acad Sci USA, 112, 2331-2336 (2015).
- 17 G. Pablo, J. Phys. Condens.Matter, 15 (45), 1669, (2003).
- 18 G. Pablo, Nature, 410, 259 (2001).
- 19 Y.Z. Chua, M. Tylinski, S.M. Tatsumi, D. Ediger, C. Schick, J. Chem. Phys, 144, 244503 (2016).

3- б ө л і м

**ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ
ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ**

Section 3

**THERMOPHYSICS
AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING**

Р а з д е л 3

**ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ
ТЕПЛОТЕХНИКА**

IRSTI 29.03.77; 29.03.85

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v83.i4.06>

P. Safarik¹ , A.S. Askarova^{2,3} , S.A. Bolegenova^{2,3} , V.Yu. Maximov² ,
 S.A. Bolegenova^{3*} , Sh.S. Ospanova² , A.O. Nugymanova² 

¹Czech Technical University in Prague, Czech Republic, Prague²Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty³Institute of Experimental and Theoretical Physics Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty*email: bolegenova.symbat@kaznu.edu.kz

STUDY OF THE AERODYNAMICS OF THE FLOW OF THE COMBUSTION CHAMBER OF A POWER PLANT WITH VARIOUS SUPPLY OF SOLID FUEL

Numerical modeling methods have been used to study the effect of an emergency stop of the fuel mixture supply through individual burners on the aerodynamics of the flow in the combustion chamber of a power boiler. The performed computational experiments made it possible to obtain the main aerodynamic characteristics of heat and mass transfer processes (full velocity vector, pressure, kinetic energy of turbulence and dissipation energy) in the volume of the combustion chamber and at the exit from it in emergency mode (two swirl burners are operating) and compare them with traditional solid fuel combustion (basic mode - four direct-flow burners are working). The results obtained indicate that with a vortex fuel supply in the central region of the combustion chamber, a sharp change in aerodynamic characteristics is observed with the formation of a vortex flow, which weakens as the pulverized coal flow and combustion products move to the exit. The presence of a vortex flow causes stable combustion of solid fuel and uniform distribution of heat flows along the walls of the combustion chamber. In addition, the vortex nature of the flow increases the residence time of coal particles in the combustion chamber, which contributes to a more complete burnout and a decrease in the mechanical underburning of the fuel mixture. Such a detailed study of the aerodynamic flow pattern that takes place in the combustion chamber of power boilers of operating TPPs can only be obtained by numerical simulation methods and by performing computational experiments. The highly informative results obtained make it possible to develop "clean" energy production technologies and solve environmental problems of the emission of harmful substances into the environment.

Keywords: numerical simulation, combustion chamber, turbulence model, velocity, pressure.

П. Шафаржик¹, Ә.С. Асқарова^{2,3}, С.Ә. Бөлекенова²⁻³, В.Ю. Максимов²,
 С.Ә. Бөлекенова^{3*}, Ш.С. Оспанова², А.О. Нұғыманова²

¹Прагадағы Чех техникалық университеті, Чехия Республикасы, Прага қ.²әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеттік және теориялық физика ФЗИ, Қазақстан,³Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеттік және теориялық физика ФЗИ, Қазақстан,

Алматы қ.

*email: bolegenova.symbat@kaznu.edu.kz

Қатты отынды әртүрлі беруге негізделген ЖЭС жану камерасындағы ағыстың аэродинамикасын зерттеу

Сандық модельдеу әдістерімен энергетикалық қазандықтың жану камерасындағы ағыс аэродинамикасына жекелеген жанағры құрылғылары арқылы отын аэроқоспасы берілуінің апattyқ кідірісінің әсері зерттелінді. Жүргізілген есептеу тәжірибелері жану камерасының көлемінде және одан шыққан кезде апattyқ режимде (екі құйынды жанағры жұмыс істейді) жылумасса тасымалы процестерінің негізгі аэродинамикалық сипаттамаларын (толық жылдамдық векторы, қысым, турбуленттіліктің кинетикалық энергиясы және диссиپация энергиясы) алуға және оларды қатты отынды дәстүрлі жағумен салыстыруға (базалық режим – төрт тұра ағынды жанағры жұмыс істейді) мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер жану камерасының орталық облысында құйын жеткізілуімен ағыстың аэродинамикалық сипаттамалардың күрт өзгеруі байқалатындығын көрсетті, құйынды ағын пайдада болады, соңғысы шаңқемірлі ағын мен жану өнімдерінің шығысқа қарай жылжу деңгейімен әлсірей

түседі. Құйынды ағыстың болуы қатты отынның тұрақты жануын және жану камерасының қабырғалары бойынша жылу ағындарының біркелкі таралуын қамтамасыз етеді. Сонымен қатар ағынның құйынды сипаты көмір бөлшектерінің жану камерасында болу үақытын арттырады, бұл отын аэроқоспасының толық жанып бітуіне және механикалық жанудың толымсыздығының төмендеуіне ықпал етеді. ЖЭС энергетикалық қазандықтарының жану камерасында жүзеге асатын ағынның аэродинамикалық бейнесін мүқият зерттеулерді тек сандық модельдеу әдістерімен және есептеу тәжірибелерін жүргізу арқылы алуға болады. Алынған жоғары ақпараттық нәтижелер энергия өндірудің «таза» технологияларын әзірлеуге және қоршаған ортаға зиянды заттар шығарылуының экологиялық проблемаларын шешуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: сандық модельдеу, жану камерасы, турбуленттілік моделі, жылдамдық, қысым.

П. Шафаржик¹, А.С. Аскарова^{2,3}, С.А. Болегенова²⁻³, В.Ю. Максимов²,

С.А. Болегенова^{3*}, Ш.С. Оспанова², А.О. Нуғыманова²

¹Чешский технический университет в Праге Чешская Республика, г.Прага

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г.Алматы

³НИИ экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби, Казахстан, г.Алматы

*email: bolegenova.symbat@kaznu.kz

Исследование аэродинамики течения камеры сгорания ТЭС с различной подачей твердого топлива

Методами численного моделирования проведено исследование влияния аварийной остановки подачи топливной аэросмеси через отдельные горелочные устройства на аэродинамику течения в камере сгорания энергетического котла. Выполненные вычислительные эксперименты позволили получить основные аэродинамические характеристики процессов тепломассопереноса (вектор полной скорости, давление, кинетическая энергия турбулентности и энергия диссипации) в объеме камеры сгорания и на выходе из нее при аварийном режиме (работают две вихревые горелки) и сравнить их с традиционным сжиганием твердого топлива (базовый режим – работают четыре прямоточные горелки). Полученные результаты свидетельствуют о том, что при вихревой подаче топлива в центральной области камеры сгорания наблюдается резкое изменение аэродинамических характеристик с образованием вихревого течения, которое ослабевает по мере продвижения пылеугольного потока и продуктов горения к выходу. Наличие вихревого течения обуславливает стабильное горение твердого топлива и равномерное распределение тепловых потоков по стенкам топочной камеры. Кроме того, вихревой характер течения увеличивает время пребывания угольных частиц в камере сгорания, что способствует болееному выгоранию и снижению механического недожога топливной аэросмеси. Такое подробное исследование аэродинамической картины течения, имеющей место в камере сгорания энергетических котлов действующих ТЭС, можно получить только методами численного моделирования и путем проведения вычислительных экспериментов. Полученные высокоинформативные результаты позволяют разрабатывать “чистые” технологии производства энергии и решать экологические проблемы выброса вредных веществ в окружающую среду.

Ключевые слова: численное моделирование, камера сгорания, модель турбулентности, скорость, давление.

Introduction

The problem of greenhouse gas emissions has now grown into a common human problem associated with global climate change on earth, flooding of vast land areas, desertification, etc. The greatest harm to the environment is caused by enterprises of heat power engineering, oil and gas industry and mechanical engineering. The share of energy

enterprises in the total volume of environmental pollution by fuel combustion products is quite large.

This problem is especially acute for Kazakhstan since coal is the main source of heat and electricity in the republic. Coal is the most abundant natural resource. A positive moment in the use of this type of fuel is its huge natural reserves, exceeding the reserves of oil and natural gas. In the context of a constant rise in the cost of hydrocarbon energy carriers, the use of coal is the most economically

profitable in various sectors of the economy of the Republic of Kazakhstan, especially in coal-mining regions. Coal-fired TPP plants use low-grade Kazakh coal with high ash content (30-50%), moisture (30-40%), sulfur content (1-3%) and low volatiles (5-15%). Its combustion causes substantial environmental problems, including a rise in toxic dust and gas emissions, as well as a deterioration of fuel ignition and burnout [1, 2].

Today, the question of the design and safety of a solid fuel combustion system is especially acute for boilers during their modernization or during the construction of power units "from scratch". The tool for mathematical 3D modeling of complicated heat and mass transfer processes in operational boiler combustion chambers is becoming increasingly popular, allowing you to assess offered technological solutions subjectively and quantitatively, as well as perform independent study.

However, sufficient precise and useful knowledge regarding the regularities of the occurrence of physical and chemical events under conditions like natural ones, as well as physical and kinetic characteristics that can only be gathered by experiments, is required for its application. A complete and accurate description of all ongoing processes in steam generators, furnaces, together with modern computational algorithms and using modern computer technology, make it possible to solve these problems for specific power plants [3, 4].

In the boiler unit during operation, damage can occur, malfunctions can occur that create dangerous situations, fraught with failure of the equipment or the boiler unit, destruction with large material losses and human casualties. Elimination of detected violations and defects is possible, considering damage, without stopping the boiler unit or with its obligatory immediate stop.

The shutdown of the boiler can be divided into three groups: planned, short-term and emergency, depending on the circumstances. Planned (complete) shutdown of the boiler is carried out according to the schedule, a short-term shutdown of the boiler unit may be caused by a violation of its normal operation due to equipment malfunction or for other reasons that can cause an accident [5, 6]. When the steam pressure in the boiler rises above the permissible level, due to a malfunction of the pressure sensor and all water-indicating devices, the presence of significant damage to the boiler's elements, or the detection of abnormalities in the boiler's operation, an emergency shutdown of the boiler may occur. [7-9].

Below are the results of computational experiments on the study of heat and mass transfer processes using the example of a real BKZ-75 boiler at Shakhtinskaya TPP, in the furnace of which high-ash Karaganda coal is burned with an ash content of

35.10%. Various methods of solid fuel supply (basic and emergency mode) are considered and the main characteristics are determined that describe the aerodynamics of the flow in the furnace space.

Research Object

The combustion chamber of the BKZ-75 boiler at the Shakhtinskaya TPP was chosen for numerical testing (Figure 1). The BKZ-75 boiler's furnace chamber is equipped with four axial-blade vortex pulverized-coal burners, which are arranged in two stages on the chamber's side walls, with direct dust injection from separate dust preparation systems. The boiler uses dust from Karaganda coal, which has a 35.10 percent ash content, a 22 percent volatile output, a 10.6 percent moisture content, and a heat of combustion of 18.55 MJ/kg. Table 1 shows the key structural features of the BKZ-75 boiler's combustion chamber.

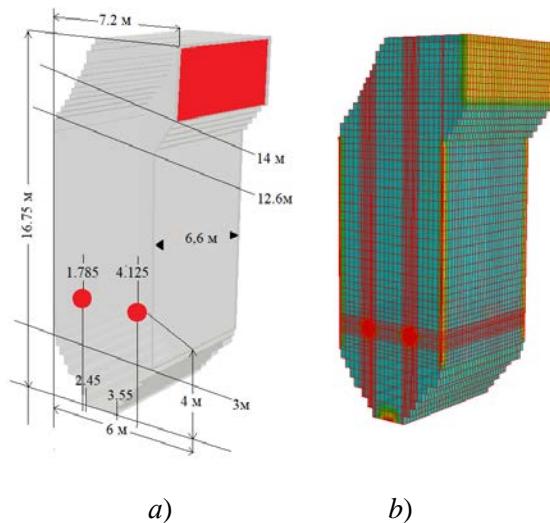


Figure 1 – Combustion chamber geometry (a) and finite difference mesh (b)

Table 1: Basic geometric parameters of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler

Name	Symbol	Unit	Value
Height of the combustion chamber	H	m	16.75
Width of the combustion chamber	b	m	6
Depth of the combustion chamber	Γ	m	6.6
Frontal and posterior wall area	F_{fr}, F_p	m^2	90.675
Area of the right-side wall	F_{s_1}	m^2	92.4
Area of the left side wall	F_{s_2}	m^2	110.55
Top wall area	F_s	m^2	27.72
Bottom wall area	F_h	m^2	7.26

The cross-sectional area of the air channel burner	F_a	m^2	0.12
The cross-sectional area of the secondary air duct in the burner	F_{sa}	m^2	0.25

The German computer software system FLOREAN was used as a starting point for conducting computational experiments to explore the mechanisms of heat and mass transfer in the combustion chamber of a CHP boiler [10-12]. This software system enables complicated computational experiments on modeling reactive multiphase flows in different scenarios, and it is widely used in Germany to investigate heat and mass transfer processes in combustion chambers of numerous thermal power plants. Numerous computer studies on the combustion of pulverized coal fuel in the combustion chambers of thermal power plants in multiple countries were undertaken by German colleagues (Germany, England, Croatia, Greece, Romania, etc.). Full-scale tests carried out directly at running TPPs were used to successfully verify the achieved results.

We established an approach for utilizing the FLOREAN software system throughout the dissertation study. The reality is that Kazakh coal (with an ash concentration of up to 50%) differs greatly from German coal (with an ash level of roughly 8%), as do the geometry of domestic combustion chambers and the manner of providing fuel and oxidizer. We had to augment, expand, and test the FLOREAN start-up software system to undertake computational studies on the burning of high-ash Kazakh coal at Kazakhstan Republic TPPs.

In accordance with the given geometry of the BKZ-75 boiler, a finite-difference grid was created for numerical simulation, which for the studied combustion chamber BKZ-75 has steps along the X, Y, Z axes: $59 \times 32 \times 67$, which is 138,355 control volumes (Figure 1). Calculations according to the numerical model are performed for the conditions adopted in the organization of a real technological process of fuel combustion at TPPs.

Computational studies were carried out to investigate alternative modes of feeding pulverized coal to the combustion chamber using computer modeling methods: 1) direct-flow technique of supplying air mixture - burners are located on opposite side walls (Figure 2b); 2) vortex technique of air mixture supply - only two vortex burners operate with the swirl angle of the air mixture flow and their inclination to the center of symmetry of the boiler by 30 degrees, and two are in emergency mode, out of four burners (Figure 2a).

The main aerodynamic parameters (velocity, pressure, kinetic energy of turbulence, and energy of

dissipation) of the heat and mass transfer process in the combustion chamber in the volume of the combustion chamber and at the outlet were obtained using computer experiments.

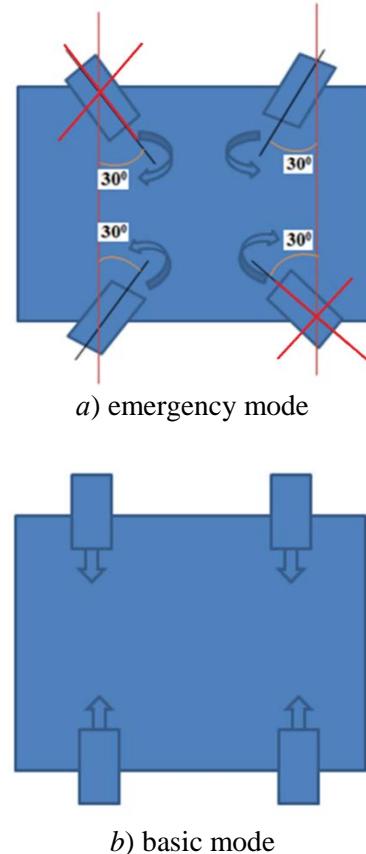


Figure 2 – Layout of burners of the combustion chamber

Physical and Mathematical Model

Physical-mathematical models used in this study include a system of three-dimensional Navies-Stokes equations, heat, and mass transfer equations, with source terms determined by the process's chemical kinetics, nonlinear effects of thermal radiation, interfacial interaction, and multi-stage chemical reactions. The basic equations used to solve the problem are [13-15].

The law of conservation of mass (continuity equation):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (p u_i) = S_m. \quad (1)$$

The law of conservation of momentum (Navies-Stokes):

$$\frac{\partial}{\partial t}(pu_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j}(pu_i u_j) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + pS_m, \quad (2)$$

where ρ is the density, u_i, u_j , are velocities in the directions i, j , x_i, x_j are Cartesian coordinates, τ_{ij} is the viscous stress tensor, P is the pressure, S_m is the interfacial interaction force.

The law of conservation of energy (the first law of thermodynamics):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(ph) = & -\frac{\partial}{\partial x_i}(pu_i h) - \frac{\partial q_i^{res}}{\partial x_i} + \frac{\partial P}{\partial t} + \\ & + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + S_h, \end{aligned} \quad (3)$$

where h is the specific enthalpy, q_i^{res} is associated with the energy transfer due to thermal conductivity of the substance flow and diffusion, S_h is the energy source due to chemical reactions and heat exchange by radiation.

The law of conservation of mixture components:

$$\frac{\partial}{\partial t}(pC_\beta) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(pC_\beta u_i) + \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + S_\beta, \quad (4)$$

where C_β is the mass concentration of β component β, j, i is the mass flow in the i -th direction, S_β is the source term of component β .

A system of turbulent transfer equations was utilized to calculate the aerodynamic properties, with the conventional k-turbulence model as the closure. This model has shown stability, efficiency, and fair accuracy in investigations of heat and mass transfer processes in turbulent reacting pulverized coal flows, making it ideal for solving industrial challenges. The standard $k-\varepsilon$ model is represented by the turbulent kinetic energy transfer equation:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \rho \cdot \varepsilon, \end{aligned} \quad (5)$$

and the dissipation equation (transformation of the kinetic energy of turbulence into internal energy) of turbulent kinetic energy ε :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + C_{\varepsilon,1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P - C_{\varepsilon,2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \cdot \rho. \end{aligned} \quad (6)$$

The basic equations used in this work can be written in generalized form as follows:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(p\phi)}{\partial t} = & -\frac{\partial(pu_1\phi)}{\partial x_1} - \frac{\partial(pu_2\phi)}{\partial x_2} - \frac{\partial(pu_3\phi)}{\partial x_3} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right] + S_\phi \end{aligned}$$

where ϕ is a transport variable; S_ϕ is the source term, which is influenced by the process' chemical kinetics, nonlinear thermal radiation effects, interphase interaction, and multi-stage chemical reactions. The above system of equations is solved numerically using the control volume method described in detail in and used in numerical computations of high-ash coal combustion in Kazakhstan's thermal power plants.

To solve the problem, the mathematical model should include specific initial and boundary conditions for desired functions (velocity, temperature, mixture component concentrations, and so on) that correspond to the geometry of the chosen combustion chamber and the real technological process of fuel combustion at TPPs.

Initial conditions: $u = 0, v = 0, w = 0, P = 0$, at $t = 0$.

The boundary conditions are set on the free surfaces, which are the burners, the exit from the furnace chamber of the boiler and the plane of symmetry.

Input: u_i are speed values, c_β is the initial concentration of each component, the enthalpy h is determined by the input flow temperature from the following relation:

$$C_P = \frac{\partial h}{\partial T} \quad (7)$$

where T is the temperature at the inlet (experiment or calculation).

Output: $\frac{\partial u_i}{\partial x_i}|_{normalA} = 0, \frac{\partial h}{\partial x_i}|_{normalA} = 0, \frac{\partial c_\beta}{\partial x_i}|_{normalA} = 0$ are derivatives of velocity, enthalpy and concentration of components normal to the output plane.

In the plane of symmetry: $u_i|_{normals} = 0$ is the velocity normal to the plane of symmetry, $\frac{\partial u_i}{\partial x_i}|_{normals} = 0, \frac{\partial h}{\partial x_i}|_{normals} = 0$, are the derivatives of velocity and enthalpy normal to the plane of symmetry, $\frac{\partial h}{\partial x_i}|_{tas} = 0$ is the derivative of the enthalpy tangential to the plane of symmetry, $\frac{\partial c_\beta}{\partial x_i}|_{normals} = 0$ is the derivative of component concentrations normal to the plane of symmetry.

On the solid surface: $u_i|_{normalB} = 0$, $\frac{\partial u_i}{\partial x_i}|_{normalB} = 0$, $u_i|_{taB} = 0$, $\partial p|_{boundary} = 0$ is the correction for pressure on the border of the solid surface, $\frac{\partial c_p}{\partial x_i}|_{normalB} = 0$.

The boundary conditions for the temperature on the wall are determined by the convective heat flux $q_w = \alpha(T_{steam} - T_{Surf})$. In case of variable temperature of the wall of the combustion chamber, the heat flux can be calculated by the formula:

$$\dot{q} = \underbrace{6(T_{FG} - T_{Surf})}_{convection} + \underbrace{C_{12}(T_{FG}^4 - T_{Surf}^4)}_{radiation}, \quad (8)$$

where $C_{12} = \varepsilon_{12}\sigma$, T_{FG} is the temperature of the flue gases, T_{Surf} is the surface temperature of the chamber wall, α is the coefficient of heat transfer by convection, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, ε_{12} is the emissivity wall, σ is the Boltzmann constant, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$.

Results and Discussion

Figures 3 and 4 show the distributions of the full velocity vector $v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ in its various sections of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler. The full velocity vector is indicated in the figures as arrows of various colors. The direction of the arrow indicates the direction of the velocity of the medium, and using the color scale, you can determine its numerical value. The case under study (emergency mode of two burners) is compared with the base case (four once-through burners). The resulting fields of the total velocity vector make it possible to analyze the movement of reacting flows in the furnace space in its various sections, which are indicated here in the figures.

It should be emphasized that the numerical values are not equal. of the total velocity vector in both modes differ significantly. This is since when the boiler is operating in the basic mode, four burners are used, through which the aerosol mixture with the oxidizer is supplied, while in the emergency mode, only two burners operate, through which (to avoid a change in the excess air ratio and loss of total power) approximately the same amount of coal dust and air. Thus, with the same diameters of the burner channels, in an emergency mode, the amount of air mixture and oxidizer is involved with a high flow rate, respectively, and the velocity of their outflow will significantly increase.

The residence period of coal particles in the middle of the combustion chamber rises in the presence of a vortex flow in the vertical plane. As a result, an increase in the flow rate has no discernible impact on the general organization of the boiler's emergency operation. As a result, at the combustion

chamber's exit, we obtain a uniform flow with about the same velocity in both circumstances (Figure 4).

The aerodynamic picture shown in Figures 3 and 4 fully characterizes the behavior of the pulverized coal flow and corresponds to the actual physical processes occurring in the combustion chamber of the BKZ 75 boiler installed at the Shakhtinskaya TPP.

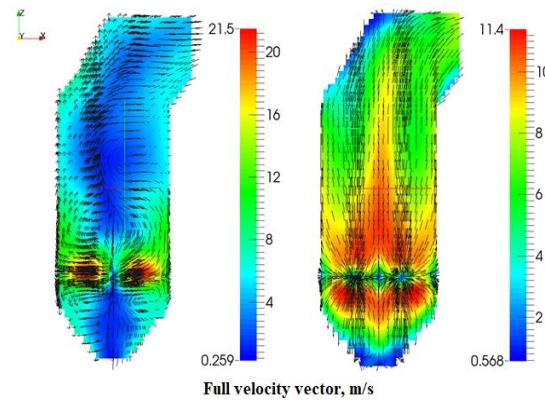


Figure 3 – Distribution of the total velocity vector in the central section ($y=3.3$ m) of the combustion chamber

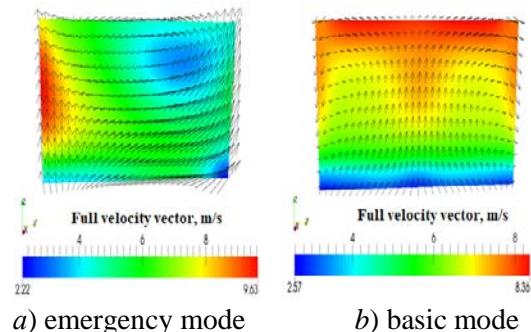


Figure 4 – Distribution of the total velocity vector at the exit from the combustion chamber

The distribution of the kinetic energy of turbulence in the main sections of the combustion chamber is shown in Figures 5 and 6. The vortex region with the greatest changes in velocity fluctuations, as well as the region with the most intensive processes of physical and chemical transformations of pulverized coal, is the area of installation of burners. In this part of the combustion chamber, the oxidation reactions of the fuel components proceed at the highest rate, as evidenced by the maxima in the distribution of the turbulent characteristics of the process.

Figures 7 and 8 depict the dissipation energy of kinetic energy of turbulence in the longitudinal portion of the BKZ-75 boiler's combustion chamber at Shakhtinskaya CHPP. It can be seen from the

presented figures that the dissipation energy reaches its maximum values in the belt of burners at a height of 4 meters, since this area is a zone of collision of pulverized coal flows, which is caused by a non-stationary disturbance of the swirling flow and in which a sharp jump of turbulent pulsations is observed. The non-stationary disturbance of vortex flows has the greatest effect on the length of the torch, its emissivity, as well as on the intensity of heat and mass transfer processes during the combustion of pulverized coal in the combustion chamber. The described behavior of the total velocity vector is also consistent with the pressure distribution in the combustion chamber.

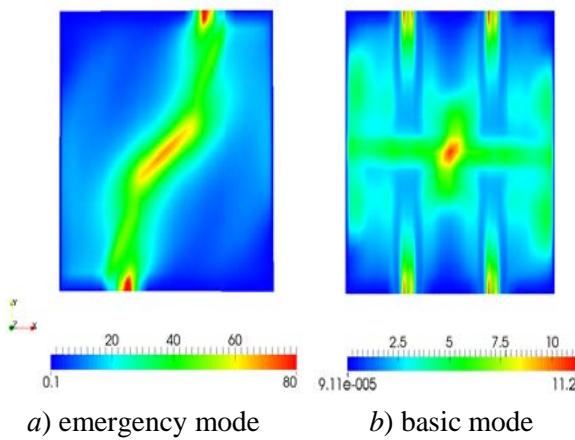


Figure 5 - Distribution of the kinetic energy of turbulence in the cross section of the burners of the combustion chamber BKZ-75 of the Shakhtinskaya TPP

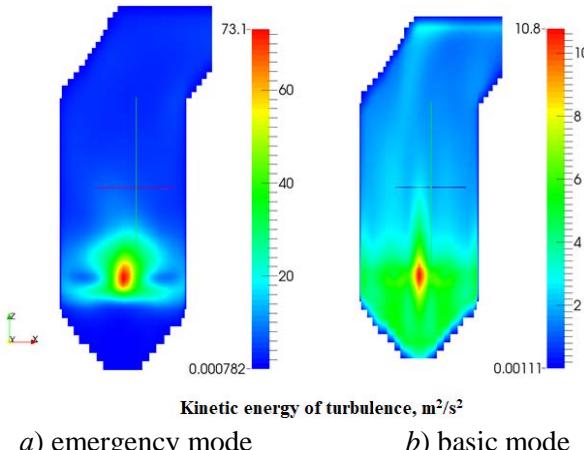


Figure 6 – Distribution of kinetic energy of turbulence in the central section ($y=3.3 \text{ m}$) of the combustion chamber

The three-dimensional pressure field in the longitudinal sections of the combustion chamber is shown in Figures 9 and 10. An analysis of the figure

shows that the pressure decreases along the height of the combustion chamber. In addition, a pronounced minimum is observed in the area where the burners are installed. This is explained by the fact that in this area there is an interaction of two oppositely directed flows of pulverized coal, which, penetrating each other, create a rarefaction in the combustion chamber. Further, the pressure continues to decrease with the height of the combustion chamber up to the section of the rotary chamber of the boiler, where, due to a change in the geometry of the combustion chamber, the air flows are redistributed and the pressure at the outlet of the combustion chamber is 7 Pa.

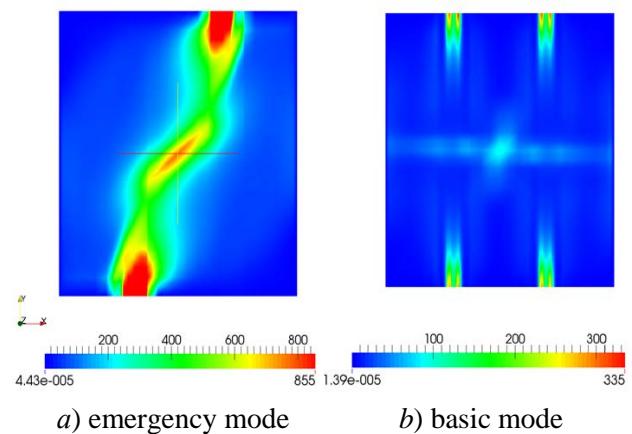


Figure 7 - Distribution of dissipation energy in the cross section of the installation of burner devices of the combustion chamber

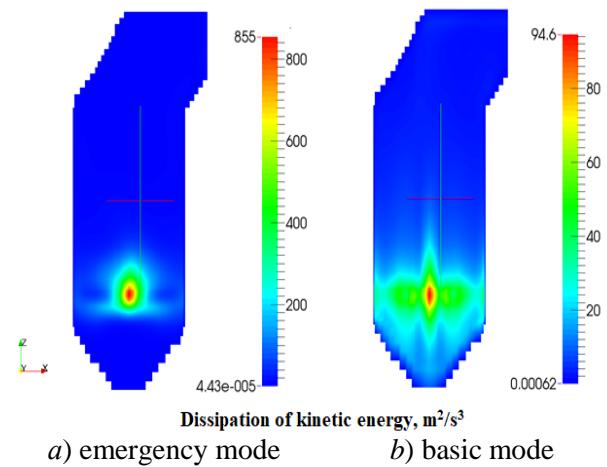


Figure 8 - Distribution of dissipation energy in the central section ($y=3.3 \text{ m}$) of the combustion chamber

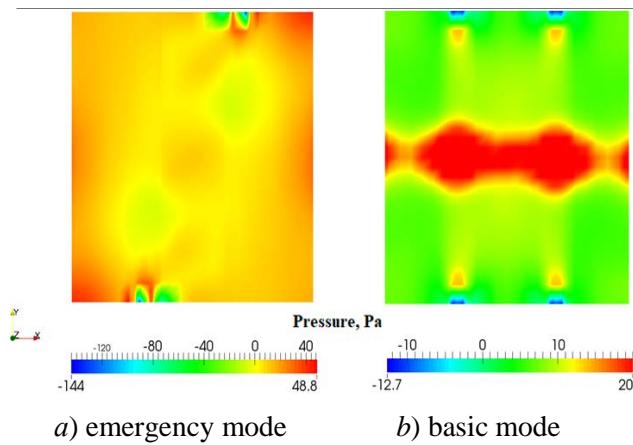


Figure 9 - Pressure fields in the burner section

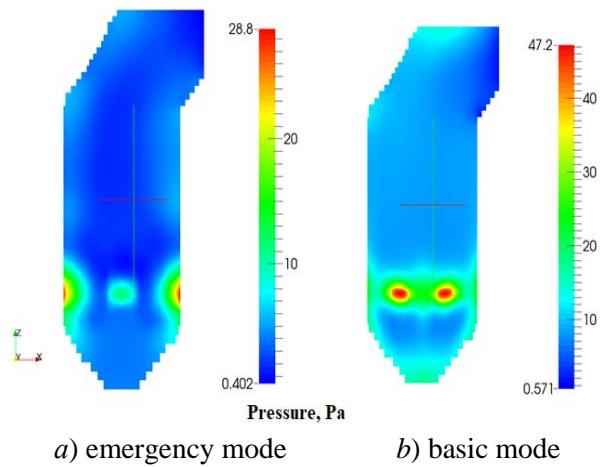


Figure 10 - Pressure fields in the central section ($y=3.3$ m) of the combustion chamber

Conclusion

The aerodynamic properties established during the computer experiment are representative of the genuine technical process seen in the combustion chambers of running TPP boilers. The above results show that there is a sharp change in the aerodynamic characteristics of the process (velocity, pressure,

kinetic energy of turbulence k , energy of dissipation ε) in the central region of the combustion chamber, with the formation of a vortex flow, which weakens as the combustion products move towards the combustion space's exit area.

The presence of a vortex motion allows the flame to ignite and stabilize more quickly. Hot gases are pulled into the torch, where they heat the combustible mixture and increase the ignition intensity. Active ascending fluxes are also present along the furnace's walls, which influences the convective component of heat transmission in the combustion chamber. Greater flame ignition at the burner's outlet is caused by the vortex nature of the flow movement inside the combustion chamber, and increased heat and mass transfer in the vortex worsens burnout.

At the same time, it is feasible to produce consistent heating of the combustion chamber surfaces and decrease slagging, extending the equipment's life. Due to the circulation of particles in the vortex flame, combustion proceeds with sufficient completeness, even with coarse grinding, which makes it possible to significantly expand the range of coal dust used. The study findings will enable effective control of fuel combustion processes in real power plants with the required impact on various parameters, as well as finding the best burner design solutions, developing optimal methods for burning high-ash coal, and reducing harmful dust and gas emissions into the atmosphere, all of which will undoubtedly contribute to solving urgent problems in thermal power engineering.

Acknowledgments

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No.AP09261161).

References

1. Safarik P., Askarova A., Bolegenova S., Nugymanova A. 3D modelling of heat and mass transfer during combustion of low-grade coal // Thermal Science. – 2020. – Vol. 24, Is. 5(A). – P. 2823-2832.
2. Bekmukhamet A., Gabitova Z., et al. Control of harmful emissions concentration into the atmosphere of megacities of Kazakhstan Republic // Proceedings of International conference on Future Information Engineering. – Beijing, 2014. – Vol. 10. – P. 252-258.
3. Maksimov V., Beketayeva M., et al. Modeling of heat mas transfer in high-temperature reacting flows with combustion // High Temperature. – 2018. – Vol. 56, Issue 5. – P. 738-743.
4. Georgiev A., Baizhuma Zh., Bolegenova S. The use of a new “clean” technology for burning low-grade coal in on boilers of Kazakhstan TPPs // Bulgarian Chemical Communications. – 2018. - Vol. 50. – P. 53-60.
5. Askarova A., Bolegenova S., Maximov V. Influence of boundary conditions to heat and mass transfer processes // International Journal of Mechanics. – 2016. – Vol. 10. – P. 320-325.
6. Heierle E.I., Manatbayev R.K., Yergaliyeva A.B. CFD study of harmful substances production in coal-fired power plant of Kazakhstan // Bulgarian Chemical Communications. – 2016. – Vol. 48, Iss. (E2). – P. 260-265.

-
7. Leithner R., Ergalieva E., Gabitova Z. Computational modeling of heat and mass transfer processes in combustion chamber at power plant of Kazakhstan // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol.76. – P. 5.
 8. Boranbayeva A.E., Bolegenova S.A., Aldiyarova A.N. Mathematical modeling of heat and mass transfer in the presence of physicalchemical processes // Bulgarian Chemical Communications. – 2016. – Vol. 48, Iss. E. – P. 272-277.
 9. Manatbayev R.K., Ospanova Sh.S., Maximov V.Yu. The computational study of heat and mass transfer processes at combustion of pulverized Kazakh coal in real conditions of energy objects // Bulgarian Chemical Communications. – 2018. – Vol. 50. – P. 61-67.
 10. Safarik P., Nugymanova A., Maximov V. 3-D modeling of heat and mass transfer process during the combustion of solid fuel in a swirl furnace // Acta Polytechnica. – 2019. – Vol. 59, Issue 6. – P. 543-553.
 11. Messerle V., Askarova A., Bolegenova S., Nugymanova A. Processes of heat and mass transfer in furnace chambers with combustion of thermochemically activated fuel // Thermophysics and Aeromechanics. – 2019. – Vol. 26, Issue 6. – P. 925-937.
 12. Nugymanova A., Maximov V., Bolegenova S. Minimization of toxic emissions during burning low-grade fuel at Kazakhstan thermal power plant // Acta Polytechnica. – 2020. – Vol. 60, Issue 3. – P. 206-213.
 13. Safarik P., Maximov V., Bolegenova S. Simulation of low-grade coal combustion in real chambers of energy objects // Acta Polytechnica. – 2019. – Vol. 59, Issue 2. – P. 98-108.
 14. Muller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reaktionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. – 1992. – Vol. 6, Issue 268. – P. 158. (in German)
 15. Leithner R., Epple B., H. Walter Simulation von Kraftwerken und wärmotechnischen Anlagen. – Vienna: Springer-Verlag, 2009. – 693 p.

References

1. P. Safarik, et al. Therm. Sci., 24, 2823-2832 (2020).
2. A. Bekmukhamet, et al., Proc. of Int. Conf. FIE 2014 (Beijing, 7-8 July, 2014), P. 252-258.
3. V. Maximov, et al. High Temp., 56, 738-743 (2018).
4. A. Georgiev, et al. Bulg. Chem. Commun., 50, 53-60 (2018).
5. A. Askarova, et al. Int. J. Mech., 10, 320-325 (2016).
6. E.I. Heierle, et al. Bulg. Chem. Commun., 48, 260-265 (2016).
7. R. Leithner, et al. MATEC Web Conf., 76, 5 (2016).
8. A.E. Boranbayeva, Bulg. Chem. Commun., 48, 272-277 (2016).
9. R.K. Manatbayev, et al. Bulg. Chem. Commun., 50, 61-67 (2018).
10. P. Safarik, et al. Acta Polytech., 59, 543-553 (2019).
11. V. Messerle, et al. Thermophys. Aeromechanics, 26, 925-937 (2019).
12. A. Nugymanova, et al. Acta Polytech., 60, 206-213 (2020).
13. P. Safarik, et al. Acta Polytech., 59, 98-108 (2019).
14. H. Muller, Fortschritt-Berichte VDI-Verlag, 6, 158 (1992).
15. R. Leithner, Simulation von Kraftwerken und wärmotechnischen Anlagen, (Springer-Verlag, 2009), 693 p.

4- б ө л і м

**БЕЙСЫЗЫҚ ФИЗИКА
РАДИОФИЗИКА**

Section 4

**NONLINEAR PHYSICS
RADIOPHYSICS**

Р а з д е л 4

**НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЗИКА
РАДИОФИЗИКА**

МРНТИ 14.35.09; 41.03.02

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v83.i4.07>

Б.А. Мукушев 

Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Казахстан, г. Астана
e-mail: mba-55@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КАРТИНА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В статье на основе энергетического подхода теоретически исследовано явление взаимодействия между космическим аппаратом (КА), Солнцем и планетами. Для изучения энергетических характеристик взаимодействия этих небесных тел выбрана гипотетическая модель: Солнце, Земля и Венера «закреплены» в момент парада планет.

Цель этой работы заключается в определении значений потенциальной энергии единичной массы в гравитационном поле Солнечной системы в каждой точке прямой, соединяющей центры этих небесных тел. Для этого рассматривается перемещение КА с поверхности Земли на поверхность Венеры и Солнца, которое происходит вдоль радиальной координатной оси, проходящей через центры Солнца и планет.

Закономерности потенциальной энергии взаимодействия (энергии связи) космического аппарата с небесными телами исследованы с использованием компьютерных вычислений. В качестве компьютерного инструмента использован пакет прикладных программ (ППП) Mathcad. С помощью Mathcad был построен график суммарной потенциальной энергии Солнечной системы. Используя вычислительные возможности ППП Mathcad, были изучены графики потенциальной энергии этих планет. Была вычислена работа двигателя космического аппарата, необходимая для перемещения его с поверхности Земли на поверхность Венеры (на поверхность Меркурия или Солнца). С помощью компьютерных инструментов ППП Mathcad исследованы графики потенциальной энергии в точках около каждой планеты (потенциальная яма планеты).

Ключевые слова: график потенциальной энергии, точка «пересадки», парад планет, обобщенная энергетическая картина, Mathcad.

B.A. Mukushev

S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Kazakhstan, Astana
e-mail: mba-55@mail.ru

Energy picture of the gravitational field of the Solar system

In the article, on the basis of the energy approach, the phenomenon of interaction between a spacecraft (spacecraft), the Sun and planets is theoretically investigated. To study the energy characteristics of the interaction of these celestial bodies, a hypothetical model was chosen: the Sun, Earth and Venus are "fixed" at the moment of the parade of planets.

The purpose of this work is to determine the values of the potential energy of a unit mass in the gravitational field of the Solar system at each point of a straight line. These straight lines connect the centers of these celestial bodies. To do this, we consider the movement of spacecraft from the Earth's surface to the surface of Venus and the Sun.

The regularities of the potential energy of interaction (binding energy) of the spacecraft with celestial bodies are investigated using computer calculations. The Mathcad application software package is used as a computer tool. Using Mathcad, a graph of the total potential energy of the Solar System was constructed. Using the computational capabilities of the Mathcad, graphs of the potential energy of these planets were studied. The operation of the spacecraft engine required to move it from the surface of the Earth to the surface of Venus (to the surface of Mercury or the Sun) was calculated. The graphs of potential energy at points near each planet (the potential pit of the planet) have been studied using computer tools of the Mathcad.

Key words: potential energy graph, "transplant" point, parade of planets, generalized energy picture, Mathcad.

Б.А. Мукушев

С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Қазақстан, Астана қ.
email: mba-55@mail.ru

Күн жүйесінің гравитациялық өрісінің энергетикалық бейнесі

Мақалада Күн жүйесінде қозғалған ғарыш аппаратының (FA) басқа аспан денелерімен өзара әрекеттесу зандылықтарын зерттеудің теориялық нәтижелері көрсетілген. Ғарыштық аппараттың Күн және басқа планеталармен өзара әсерлесуін сипаттайтын байланыс энергиясының тендеулері зерттелді. Біз траекториясы қараптырылып отырған аспан денелерінің центрлері арқылы өтетін ғарыш аппаратының тұзу сызықты қозғалысын таңдадық. Аспан денелерінің өзара әсерлесу энергиясын зерттеу мақсатында гипотетикалық модель таңдалып алынып, «Күн және планета» жүйесінің планеталар парады жағдайындағы «бекітілген» моделі қараптырылды.

Бұл жұмыстың мақсаты – Жер, Венера және Күн центрлерін байланыстыратын түзудің әр нүктесіндегі бірлік массаның Күн жүйесінің гравитациялық өрісіндегі потенциалды энергиясының мәндерін анықтау. Ол үшін FA-ның Жер бетінен Венера мен Күн бетіне орын ауыстыруы қараптырылды. Мұндан орын ауыстыру Күн мен планеталардың орталықтары арқылы өтетін радиальдық координаталық ось бойымен жүреді.

Ғарыш аппараты мен басқа аспан денелері арасындағы байланыс энергиясы компьютерлік есептеулер арқылы зерттеледі. Компьютерлік құрал ретінде Mathcad қолданбалы бағдарламалар пакеті қолданылды. Mathcad пакеті көмегімен Күн жүйесінің жалпы потенциалды энергиясының графигі жасалды. Mathcad пакетінің есептеу мүмкіндіктерін қолдана отырып, осы планеталардың потенциалды энергиясының графиктері зерттелді. Ғарыш аппаратын Жер бетінен Венера бетіне (Меркурий немесе Күн бетіне) орын ауыстыру үшін қажет жұмыс мөлшері есептелді. Mathcad компьютерлік құралдары көмегімен әр планетаның маңайындағы нүктелердегі потенциалды энергияның графигі зерттелінді (планетаның потенциалдық шұнқыры).

Түйін сөздер: потенциалдық энергия графигі, «ауысу» нүктесі, планеталар шеруі, жалпыланған энергетикалық бейне, Mathcad.

Введение

В настоящее время освоение космического пространства реализуется в трех направлениях: околоземные полеты, т.е. создание искусственных спутников Земли различного назначения; полеты к Луне; полеты к планетам и другим небесным телам Солнечной системы. Триумфальные достижения человечества в космической технике в каждом из этих направлений хорошо известны. Движение искусственных спутников Земли и Солнца, облет естественного спутника Земли на космическом корабле и высадка на Луну, запуск искусственного спутника Луны, посадки на поверхности Венеры и Марса, исследование Юпитера с пролетной траекторией и другие космические полеты исследуются на основе законов гравитационного притяжения между космическим аппаратом и небесными телами Солнечной системы [1-9]. Здесь использован энергетический подход к изучению гравитационного поля Солнечной системы и

компьютерный метод, необходимый для вычисления численных значений параметров этого поля

Объектом исследования является общая картина потенциальной энергии гравитационного поля Солнечной системы. В качестве предмета исследования выступает потенциальная энергия единичной массы в гравитационном поле Солнечной системы. Целью этой работы является изучение энергетического состояния единичной массы, находящейся в различных точках радиальной оси, соединяющей центры Земли, Венеры и Солнца.

Были поставлены следующие задачи: определить посредством компьютерной программы численные значения потенциальной энергии тела единичной массой в каждой точке радиальной оси в гравитационном поле Солнечной системы; построить график потенциальной энергии этого тела в Солнечной системе, описывающий энергетическую картину гравитационного поля Солнечной системы в зависимости от расстояния центра Солнца; на

основе изучения этого графика определить параметры точек «пересадки» космического аппарата, которые расположены между небесными телами; проводить численный анализ графиков потенциальной энергии тела единичной массой в гравитационном поле планет и Солнца посредством ППП MathCAD [10], когда это тело находится в различных точках поверхности этих небесных тел.

Методика исследования

Перемещение космического аппарата к другим планетам Солнечной системы с учетом гравитационного поля Солнца

Исследуем космическое путешествие КА с поверхности Земли в планету Венера с учетом гравитационного влияния Солнца. Выберем гипотетическую модель, где Солнце, Земля и Венера «закреплены», и их центры находятся на одной прямой (радиальной оси) (рисунок 1).



Рисунок 1 – Расположение Солнечной системы в момент «парад планет»

Рассмотрена потенциальная энергия КА массой m в системе «Земля – Венера – Солнце» для 4 случаев, в которых рассматривается энергетическое состояние космического аппарата, когда он будет находиться в различных точках радиальной оси, соединяющей центры рассматриваемых небесных тел.

1. На основе принципа суперпозиции полей напишем значение потенциальной энергии КА в системе «Земля–Венера – Солнце» для любой точки радиальной оси, в условиях $|r| > R_C$:

$$U(r) = -\frac{GmM_C}{|r|} - \frac{GmM_B}{|l_1 - r|} - \frac{GmM_3}{|l_2 - r|},$$

где M_C – масса Солнца, l_1 – расстояние центров Солнца и Венеры, l_2 – расстояние центров Солнца и Земли.

2. При $|r| \leq R_C$ потенциальную энергию КА для поверхности Солнца напишем так:

$$U(r) = -\frac{GmM_C}{r} \left(\frac{r}{R_C} \right).$$

3. Вычислим значение потенциальной энергии КА в системе «Венера – Солнце» для случая, когда КА находится на поверхности Венеры.

$$U(r) = -G \frac{mM_B}{R_B} - \frac{GmM_C}{r},$$

где r лежит в интервале $l_1 - R_B \leq r \leq l_1 + R_B$. Не будем учитывать гравитационное влияние Земли на поверхности Венеры в связи с тем, что

$$\left| -G \frac{mM_B}{R_B} \right| \gg \left| -G \frac{mM_3}{l_2 - l_1 - R_B} \right|.$$

4. Вычислим значение потенциальной энергии КА в системе «Земля–Солнце» для случая, когда КА находится на поверхности Земли.

$$U(r) = -G \frac{mM_3}{R_3} - \frac{GmM_C}{r}.$$

Дно «потенциальной ямы» Земли находится в интервале

$$l_2 - R_3 \leq r \leq l_2 + R_3.$$

Здесь не учитывается гравитационное влияние Венеры на поверхности Земли, так как

$$\left| -G \frac{mM_3}{R_3} \right| \gg \left| -G \frac{mM_B}{l_2 - l_1 - R_3} \right|.$$

Результаты и обсуждение

Создана компьютерная программа в среде MathCAD, где учтены все гравитационные действия, которые испытывает КА массой 1 кг в зависимости от различных его координат в системе «Земля – Венера – Солнце» (рисунок 2) [10-13].

На рисунке 2 (листинге) M_C обозначено через \mathbf{M}_0 , M_B – через \mathbf{M}_1 , M_3 обозначено через \mathbf{M}_2 , а $R_C \rightarrow \mathbf{R}_0$, $R_B \rightarrow \mathbf{R}_1$, $R_3 \rightarrow \mathbf{R}_2$. Единицы по осям системы координат представлены в системе СИ (ордината $U(r)$ – в джоулях, абсцисса r – в метрах).

Эти планеты не рассматриваются как материальные точки. Посредством данной компьютерной программы построим график потенциальной энергии единичной массы в Солнечной системе (нижняя часть рисунка 3).

Здесь не видны «потенциальные ямы» Венеры и Земли в связи с тем, что значения «глубины потенциальной ямы» этих планет около 3000 раз меньше чем глубина «потенциальной ямы» Солнца. Для обнаружения «потенциальноых ям» планет масштаб ординаты графика потенциальной энергии единичной массы в

Солнечной системе был увеличен 500 раз, и был получен график в верхней части рисунка 3. Из этого графика видны едва заметные вертикальные пики, абсциссы которых соответствуют значениям расстояний этих планет от центра Солнца.

$$\begin{aligned}
 M_0 &:= 2.00 \cdot 10^{30} \text{ - Масса Солнца; } R_0 := 7.00 \cdot 10^8 \text{ - Радиус Солнца;} \\
 M_1 &:= 4.87 \cdot 10^{24} \text{ - Масса Венеры; } R_1 := 6.05 \cdot 10^6 \text{ - Радиус Венеры;} \\
 M_2 &:= 6.00 \cdot 10^{24} \text{ - Масса Земли; } R_2 := 6.40 \cdot 10^6 \text{ - Радиус Земли;} \\
 G &:= 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ - Гравитационная постоянная; } m := 1 \\
 l_1 &:= 1.08 \cdot 10^{11} \text{ - Расстояние между центрами Солнца и Венеры;} \\
 l_2 &:= 1.50 \cdot 10^{11} \text{ - Расстояние между центрами Солнца и Земли;} \\
 U(r) &:= \begin{cases} -G \cdot \frac{m \cdot M_0}{|r|} - G \cdot \frac{m \cdot M_1}{|l_1 - r|} - G \cdot \frac{m \cdot M_2}{|l_2 - r|} & \text{if } |r| > R_0 \\ \left[-G \cdot \frac{m \cdot M_0}{r} \left(\frac{r}{R_0} \right) \right] & \text{if } |r| \leq R_0 \\ -G \cdot \frac{m \cdot M_1}{R_1} - G \cdot \frac{m \cdot M_0}{r} & \text{if } l_1 - R_1 \leq r \leq l_1 + R_1 \\ -G \cdot \frac{m \cdot M_2}{R_2} - G \cdot \frac{m \cdot M_0}{r} & \text{if } l_2 - R_2 \leq r \leq l_2 + R_2 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Рисунок 2 – Листинг расчета задачи

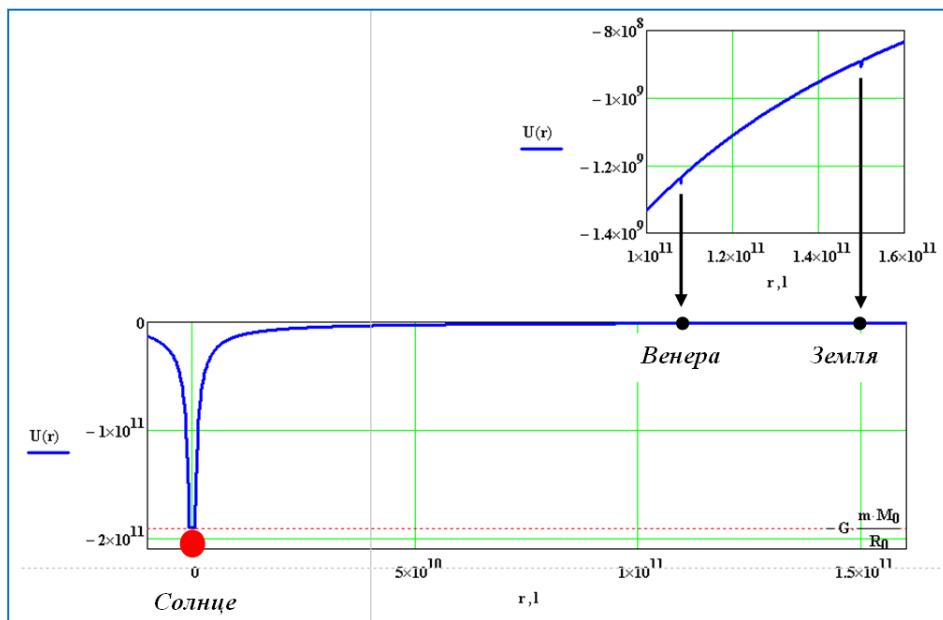


Рисунок 3 – График потенциальной энергии единичной массы в Солнечной системе

График потенциальной энергии единичной массы в Солнечной системе (рисунок 3) описывает энергетическую картину гравитационного поля Солнечной системы в зависимости от расстояния центра Солнца [10-12].

Для увеличения масштаба этих «гравитационных пиков» используем команду «Масштаб» в MathCAD. При увеличении масштабов этих пиков получим «потенциальные ямы» Венеры и Земли, представленные на рисунке 4.

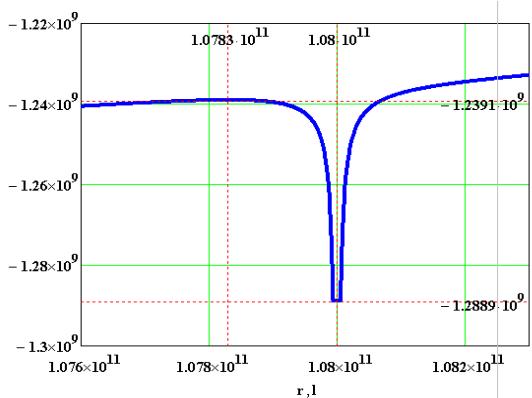
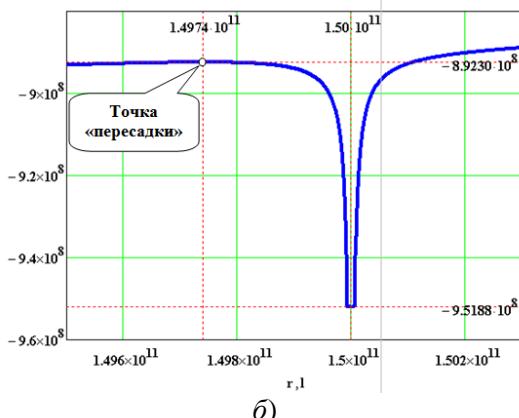
*a)**б)*

Рисунок 4 – Графики потенциальной энергии единичной массы вблизи Венеры и Земли

С энергетической точки зрения совершение космический полет с Земли к Венере (или к Меркурию в условиях парада планет) – это значит выходить со дна потенциальной ямы поля тяготения Земли и свободно падать на дно потенциальной ямы Венеры (или другой планеты). Для этого космическому аппарату достаточно преодолеть точку «пересадки», абсцисса которой равна $1,4974 \cdot 10^{11} \text{ м}$. (Рис.4б).

Теперь найдем расстояние центра Земли от точки «пересадки»:

$$1,50 \cdot 10^{11} - 1,4974 \cdot 10^{11} = 2,6 \cdot 10^8 \text{ м.}$$

или около 260 тысяч км, а расстояние от центра Венеры до точки «пересадки» равно – 41740 тыс.км.

Минимальную работу, необходимую для перемещения КА массой m с поверхности Земли на поверхность Венеры, (или на поверхность Меркурия в условиях парада планет в «закрепленном» состоянии) можно выразить как:

$$A \approx U(r_C) - U(R_3) = -8,9230 \cdot 10^8 m - (-9,5188 \cdot 10^8 m) \approx 0,5958 \cdot 10^8 m \text{ (Дж).}$$

Для того чтобы совершить «мягкую» посадку на поверхность Венеры без парашюта, её нужно погасить. Для гашения скорости (это делается тормозным двигателем) нужна энергия не меньше $\sim 3,9590 \cdot 10^8 m$ Дж. Следовательно, при совершении «мягкой» посадки на поверхность Венеры минимальная работа должна быть:

$$A \approx 0,5958 \cdot 10^8 m + 3,9590 \cdot 10^8 m \approx 4,5548 \cdot 10^8 m \text{ (Дж).}$$

Для возвращения КА с Венеры на Землю и совершения свободного падения на ее поверхность необходимо больше энергии, чем совершить посадку на поверхность этой планеты. Величину этой энергии можно вычислить, используя графики потенциальной энергии единичной массы вблизи Венеры и Земли (рис. 4). Пользуясь командой «Трассировка» в MathCAD, можно определить значение потенциальной энергии, соответствующей любой точке этого графика (рис. 5).

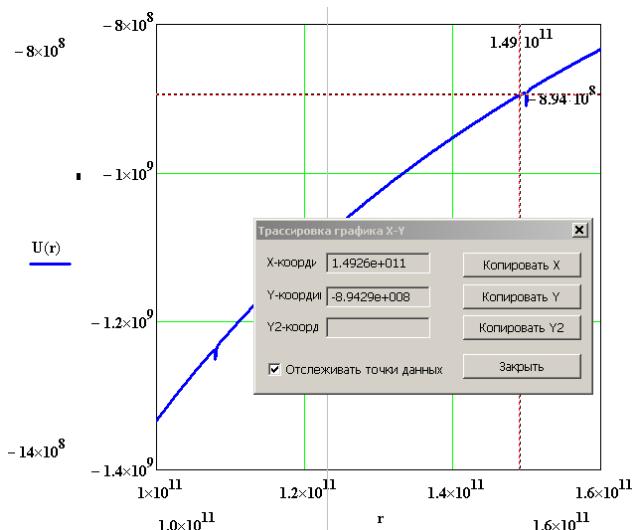


Рисунок 5 – Применение команды «Трассировка» для определения параметров точки «пересадки» вблизи Земли

Для совершения мягкой посадки на поверхность Земли нужна такая же энергия, как у КА, который бы мягко сел на Венеру. Также, можно найти минимальную работу, необходимую для перемещения КА массой m с поверхности Венеры на поверхность Меркурий или Солнца.

В реальных условиях затраты энергии двигателя КА для перелета с поверхности Земли на поверхность Венеры при «жесткой» и «мягкой» посадках в разы больше, чем дают наши расчеты по вычислению этих значений. Во-первых, коэффициент полезного действия реактивного двигателя находится в интервале $\sim (0,35 \div 0,45)$; во-вторых, ступеньки, при отрыве от двигателя, забирают часть механической энергии космического аппарата; в-третьих, космические аппараты не запускаются по прямой, проходящей по центрам планет и Солнца. Они поднимаются с поверхности Земли по очень сложной орбите и при движении испытывают многочисленные корректировки траектории полета, что требует большую затрату энергии.

Если исследуем дно «потенциальных ям» этих планет и Солнца с помощью команды «Масштаб», то получим новые результаты, доказывающие явное доминирование гравитации Солнца в околосолнечном пространстве. Таким образом, получим новые увеличенные десятки раз графики потенциальной энергии систем «КА-Солнце-Венера» (рис.6а) и «КА-Солнце-Земля» (рис. 6б).

Из рисунка отчетливо видно, что в точках поверхности планет, которые находятся в минимальном расстоянии от центра Солнца потенциальная энергия единичной массы в Солнечной системе меньше, чем в точках, расположенных в противоположной поверхности планет. Этот случай еще раз доказывает, что солнечное гравитационное влияние на поверхность планеты изменяется в зависимости от расстояния от центра Солнца.

Космический аппарат, когда находится на поверхности Земли (или других планет), почти не испытывает гравитационное влияние Венеры (или других планет), однако придется учесть гравитацию Солнца. Такой вывод можно сделать и по отношению к Венере.

На рисунке 7 представлены результаты компьютерного исследования посредством команды «Масштаб» дна «потенциальной ямы» Солнца.

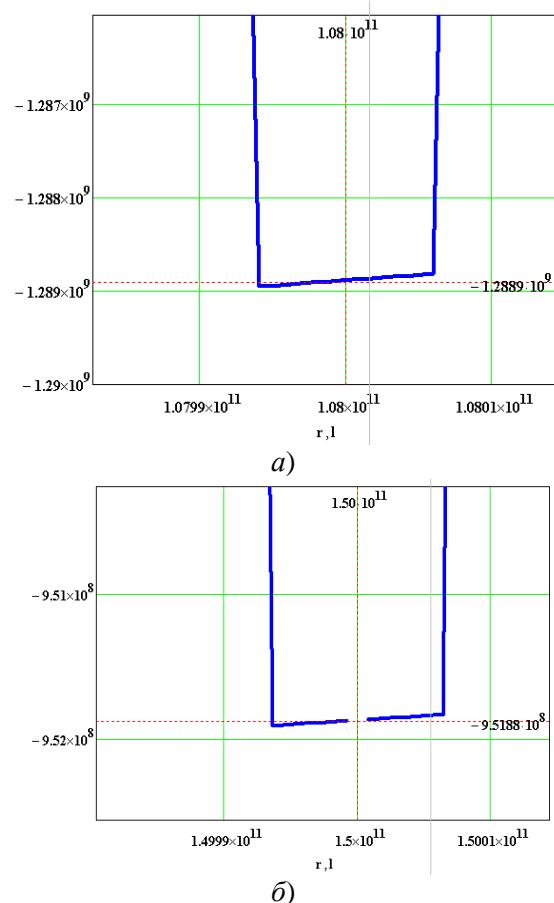


Рисунок 6 – Графики дна «потенциальных ям» Венеры и Земли

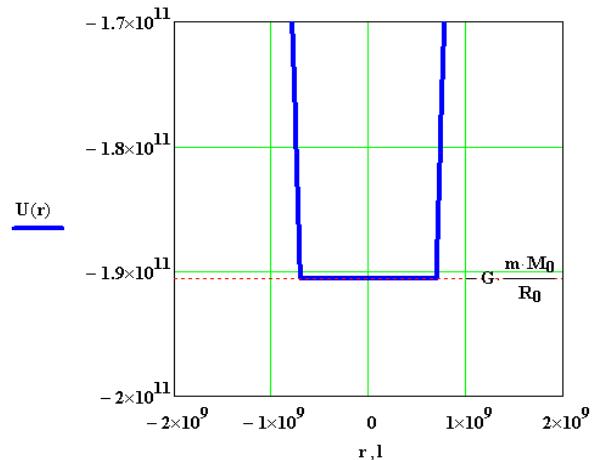


Рисунок 7 – График дна «потенциальной ямы» Солнца

Из графика делаем вывод, что гравитационное влияние планет на Солнце можно считать ничтожным.

Заключение

На основе энергетического подхода исследованы закономерности взаимодействия движущегося тела с другими небесными телами в Солнечной системе. Рассмотрено одно из простых состояний Солнечной системы – парад планет. Произведены вычисления энергетического состояния космического аппарата в зависимости от радиальной координаты. В результате исследования получены следующие научные результаты:

- на основе компьютерных вычислений и графиков изучены уравнения потенциальной энергии (энергии связи) взаимодействия тела единичной массой с Солнцем и другими планетами;

- исследована обобщенная энергетическая картина системы «Солнце и планеты», что представляет собой энергию связи космического аппарата в суммарном гравитационном поле всех субъектов Солнечной системы;

- вычислены минимальные значения работы внешних сил, необходимые для передвижения космического аппарата с поверхности одной небесных тел на поверхность других вдоль радиальной координатной оси;

- проведен численный анализ дна «потенциальных ям» рассматриваемых планет и Солнца посредством ППП MathCAD, характеризующих потенциальную энергию единичной массой в гравитационном поле этих небесных тел.

Дальнейшее изучение рассматриваемой проблемы позволяет выйти на следующие направления данного исследования: проведение теоретических, графических и компьютерных вычислений для произвольных расположений планет в Солнечной системе, изучение возможностей гравитационного маневра космического аппарата внутри Солнечной системы и другие.

Благодарности

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № АР14869376 «Развитие междисциплинарной исследовательской способности студентов при реализации синергетического образования в высшей школе»).

Литература

1. Левантовский В. И., Механика космического полета в элементарном изложении. – М.: Наука. Физматлит, 1980. – 512 с.
2. Киттель Ч., Найт В., Рудерман М. Механика (Берклевский курс физики): Учебное руководство. – М: Наука. Физматлит, 1983. – 448 с.
3. Feynman R., Leighton R., Sands M. The Feynman lectures on physics. Vol. 2. – London: Addison-wesley publishing company, 1964. – 288 p.
4. Interplanetary flight. <http://www.braeunig.us/space/interpl.htm>
5. Martz C., Van Middelkoop S., Gkigkitzis I., Haranas I., Kotsireas I. Yukawa Potential Orbital Energy: Its Relation to Orbital Mean Motion as well to the Graviton Mediating the Interaction in Celestial Bodies // Hindawi Advances in Mathematical Physics. – Vol.2019, Article ID 6765827, 10 p.
6. McNutt R.L.Jr., Solar System Exploration: A Vision for the Next Hundred Years //IAC-04-IAA.3.8.1.02, 55th Intern. Astronautical Congress, Vancouver, Canada. – 2004.
7. Torres-Silva H. Electrodinámica Quiral: Eslabón para la Unificación del Electromagnetismo y la Gravitación //Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. – 2008. – Vol. 16 nº especial. – P. 6-23.
8. Samokhin A.S. and Samokhina M.A. Optimization of the interplanetary flight to Mars with three-pulse approach to Phobos based on Lagrange principle // Journal of Physics Conference Series. – 2021. – Vol. 1864(1). – Art.No 012130.
9. Shane D. Ross. The Interplanetary Transport Network // American Scientist. – 2006. – Vol. 94(3). – P. 230.
10. Мукушев Б.А. Пакет прикладных программ Mathcad // Вестник КазАТУ. – 2022. – №2 (113). Ч.2. – С. 197-202.
11. Nelson F. Using mathcad to simplify uncertainty computations in a laboratory course // Computer Applications in Engineering Education. – 2014. – Vol. 23, № 2. – P. 250-257.
12. Мукушев Б.А., Мукушев А.Б., Таширова М.Б., Аширабаева Д.Н., Калхаман К.С., Салмырза Г.Ж., Сахиева С.М. Реализация вычислительных экспериментов для изучения небесной механики на основе энергетического подхода // Вестник ЕНУ (Физика). – 2021. – № 3. – С. 25-34.

References

1. V.I. Levantovsky, Mekhanika kosmicheskogo poleta v elementarnom izlozenii, (Moscow, Nauka. Fizmatlit, 1980), 512 p. (in Russ).
2. Ch. Kittel, V. Knight, M. Ruderman Mechanica, (Berkeley Physics course) Textbook (Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1983), 448 p. (in Russ).
3. R. Feynman, R. Leighton, M. Sands, The Feynman lectures on physics, Vol. 2, (London, Addison-wesley publishing company, 1964), 288 p.
4. Interplanetary flight. <http://www.braeunig.us/space/interpl.htm>
5. C. Martz, S. Van Middelkoop, I. Gkigkitzis, I. Haranas, I. Kotsireas Hindawi Advances in Mathematical Physics, 2019, 6765827 (2019).
6. R.L.Jr. McNutt, Solar System Exploration: A Vision for the Next Hundred Years, IAC-04-IAA.3.8.1.02, 55th Intern. Astronautical Congress, Vancouver, Canada, (2004).
7. H. Torres-Silva, Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 16 nº especial, 6-23 (2008).
8. A.S. Samokhin and M.A. Samokhina, Journal of Physics Conference Series, 1864(1), 012130 (2021).
9. Shane D. Ross, American Scientist, 94(3), 230 (2006).
10. B.A. Mukushev, Bulletin of KazATU, No2 (113), Part 2, 197-202 (2022). (in Russ.)
11. F. Nelson, Computer Applications in Engineering Education, 23 (2), 250-257 (2014).
12. B.A .Mukushev, et al, Vestnik ENU (Fizika), 3, 25-34 (2021). (in Russ.)

МРНТИ 14.35.09

<https://doi.org/10.26577/RCPh.2022.v83.i4.08>

Ю.П. Похолков^{1,2} , И.О. Муравлев¹ , М.Ю. Червач^{1*} 

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия г. Томск

²Ассоциация инженерного образования России, Россия, г. Москва

*e-mail: chervachm@tpu.ru

МЕТОДИКА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КОМПЕТЕНЦИЙ, ПРИОБРЕТАЕМЫХ СТУДЕНТАМИ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИКО-ХИМИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ»

В данной статье предложен детерминированный (не вероятностный) подход к оценке результатов обучения (РО) с использованием простейшей математической модели на примере оценки результата обучения студентов высших учебных заведений по дисциплине «Физико-химия диэлектрических материалов». Реализация этого подхода предполагает последовательное движение в условиях принятых допущений от общего непротиворечивого понятия «качество инженерного образования» к его составляющим, детализации результатов обучения, их количественной оценке и, с учётом требуемых уровней результатов обучения, как по основной образовательной программе (ООП) в целом, так и по конкретным дисциплинам в неё входящим.

Предложены и описаны принципы построения и реализации рабочей программы любой из дисциплин, входящих в ООП. Предложенные нами в работе алгоритм оценки уровня освоения студентом планируемых компетенций и математическая модель позволяют осуществить количественную оценку «знанияевой» и «деятельностной» составляющих образования и, в конечном итоге, количественную оценку уровня освоения студентом запланированных компетенций. Использованный подход, алгоритм, а также математическая модель могут быть применены преподавателем для самооценки и выработки мер по совершенствованию учебного процесса.

Ключевые слова: инженерное образование, учебный процесс, результаты обучения, компетентностный подход, математическая модель, дисциплины естественнонаучного цикла, количественная оценка.

Yu. Pokholkov^{1,2}, I. Muravlev¹, M. Chervach^{1*}

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk

²Association for Engineering Education of Russia, Russia, Moscow

*e-mail: chervachm@tpu.ru

Methodology and mathematical model for assessing competencies acquired by students in the process of studying the discipline "Physical Chemistry of Dielectric Materials"

The article proposes a deterministic (not probabilistic) approach to assessing learning outcomes (LO), using a simple mathematical model for assessing the results of students' learning within a course "Physical Chemistry of Dielectric Materials". Implementation of this approach involves a consistent shift, under the conditions of the assumptions made, from a general consistent concept of "quality of engineering education" to its components, detailing the learning outcomes, their quantitative assessment and, taking into account the required levels of learning outcomes, both for the main educational program in general, and for specific courses included in it. Principles for design and implementation of any course syllabus included in a study program are proposed and described. Both, the proposed algorithm for assessing student's level of mastering of the expected competencies and the mathematical model allow for a quantitative assessment of the "knowledge" and "activity" components of education and, ultimately, a quantitative assessment of the level of student's mastering of the planned competencies. The proposed approach, algorithm and mathematical model can be used by teachers for self-assessment and improvement of the educational process.

Key words: engineering education, educational process, learning outcomes, competence approach, mathematical model, disciplines of the natural science cycle, quantification.

Ю.П. Похолков^{1,2}, И.О. Муравлев¹, М.Ю. Червач^{1*}

¹ Томск политехникалық ұлттық зерттеу университеті, Ресей, Томск қ.

²Ресейдің инженерлік білім беру қауымдастыры, Ресей, Мәскеу қ.

*email: chervachm@tpu.ru

«Диэлектрлік материалдардың физикалық химиясы» пәнін оқу барысында студенттердің алған құзыреттіліктерін бағалаудың әдістемесі мен математикалық моделі

Бұл зерттеу жұмысында «Диэлектрлік материалдардың физикалық химиясы» пәні бойынша жоғары оқу орындары студенттерінің оқу нәтижесін бағалау мысалында қарапайым математикалық модельді пайдалана отырып, оқу нәтижелерін (ОН) бағалаудың детерминирленген (ықтималдық емес) тәсілі ұсынылған және нәтижелері тексерілген. Бұл тәсілді жүзеге асыру қабылданған жорамалдар жағдайында «инженерлік білім сапасы» жалпы дәйекті тұжырымдамасынан оның құрамдас бөліктеріне, оқыту нәтижелерін егжей-тегжейлі көрсетуге, олардың сандық бағасына және қажетті деңгейлерді ескере отырып, жалпы жағдайда негізгі білім беру бағдарламасындағы (НБББ) сияқты және оған енгізілген нақты пәндер үшін оқу нәтижелері бойынша да дәйекті қозғалысты болжайды.

Мақалада негізгі білім беру бағдарламасына кіретін кез келген пәннің жұмыс бағдарламасын құру және орындау принциптері ұсынылып, сипатталған. Оқушының жоспарланған құзіреттіліктерді менгеру деңгейін бағалаудың ұсынылған алгоритмі және математикалық моделі білім берудің білім мен іс-әрекет компоненттерін сандық бағалауға, сыйып келгенде, оқушының жоспарланған құзыреттіліктерді менгеру деңгейін сандық бағалауға мүмкіндік береді. Қолданылған тәсілді, алгоритмді, сондай-ақ математикалық модельді жаратылыстану пәндердің оқытушысы өзін-өзі бағалау және оқу-тәрбие процесін жетілдіру шараларын әзірлеу үшін пайдалана алады.

Түйін сөздер: инженерлік білім, тәрбие процесі, оқыту нәтижелері, құзыреттілік көзқарас, математикалық модель, жаратылыстану циклінің пәндері, сандық бағалау.

Введение

Качество инженерного образования – тема, которая не сходит со страниц изданий, публикующих статьи по проблемам образования [1-3].

Результаты обучения будущих специалистов в области техники и технологии, полученные в высших учебных заведениях, далеко не всегда соответствуют требованиям многочисленных стейкхолдеров, спектр требований которых разнообразен, а иногда и противоречив. Свидетельством этого несоответствия является наличие на предприятиях системы «доучивания» выпускников инженерных образовательных программ, продолжительный период их адаптации к условиям производства. Наиболее убедительно демонстрация этого факта подтверждается организацией корпоративных университетов при крупных корпорациях, таких как, например, в России – Газпром, Росатом и другие [4].

Причин такого положения несколько, и их анализ мы можем встретить в статьях авторитетных специалистов в сфере инженерного образования, экспертов и представителей, как

академического сообщества, так и предприятий реального сектора экономики [5-8].

Содержание образовательных программ, образовательные технологии, оборудование, инфраструктура вуза, квалификация профессорско-преподавательского состава, в том числе и их производственный опыт, методы и формы контроля результатов обучения, связь с предприятиями и инжиниринговыми структурами ведущих компаний, рутина и косность в деятельности – всё это факторы, от которых зависит уровень подготовки специалистов в области техники и технологии и, в конечном итоге, технологическое благополучие общества [9,10].

Общепринятой, традиционной системой оценки уровня подготовки выпускников высших учебных заведений, в том числе и инженерных, является пятибалльная система, которая используется как в процессе обучения (назначение различного уровня стипендий, определение победителей в конкурсах и пр.), при окончании вуза (диплом с отличием), так и при приёме на работу.

Осознание научно-образовательным сообществом того, что такая оценка далеко не всегда может служить единственным критерием

оценивания результатов обучения и степени подготовки выпускника к реальной производственной деятельности пришло в последние 15-20 лет в связи с научно-технической революцией, охватившей, по существу, весь мир [11]. Мир кардинально меняется, и система образования, традиционно консервативная, медленно, но всё-таки следует этим изменениям. В системе средних учебных заведений появилась инициатива WorldSkills, позволяющая оценивать навыки практической деятельности выпускников учебных заведений среднего профессионального образования (СПО) [12].

В системе высшего инженерного образования стали использовать, так называемый, компетентностный подход при конструировании образовательных программ и рабочих программ дисциплин.

В связи с этим, возникла необходимость модернизации образовательных технологий и усовершенствования системы контроля результатов обучения. Интерактивность в образовательном процессе, вовлечение в него студентов, увеличенный объём их самостоятельной работы, проектно-организованное, проблемно- и практико-ориентированное обучение – всё это можно считать иллюстрацией изменений в системе высшего образования. В мировой и российской практике инженерного образования можно увидеть яркие и эффективные примеры таких инноваций. Это, например, инициатива CDIO, начавшая своё движение из Массачусетского технологического института (MIT, USA) ещё в 2000 году, система группового проектного обучения Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), базовые кафедры на предприятиях и в организациях реального сектора экономики, мобильность в образовании (совместные образовательные программы), позволяющая студентам учиться по программам различных университетов – программа Heriot-Watt (UK) и Томского политехнического университета в области нефтегазового дела и другие [13-15].

В то же время, даже поверхностный анализ состояния учебного процесса в инженерных вузах позволяет увидеть типичные и стойкие недостатки в их деятельности, которые сдерживают их движение в направлении повышения качества инженерного образования.

Первым и наиболее стойким недостатком, по нашему мнению, является формальное и неформальное признание среднего балла, набранного учащимся за период обучения, в качестве итоговой оценки результата обучения.

Следование традиционным методам организации учебного процесса (лекции, практические занятия, лабораторные работы...) больше склоняет систему к такому же традиционному методу контроля результатов обучения (экзамены и зачёты).

Использование компетентностного подхода к проектированию образовательной программы и разработке рабочих программ дисциплин становится пустой формальностью при сохранении традиционного способа обучения и методов контроля его результатов. Мы продолжаем преимущественно формировать и контролировать знания, не уделяя должного внимания не только двум другим важным составляющим любой компетенции – умениям и навыкам, но даже не оценивая уровень осведомлённости студентов об умениях.

Указанные недостатки в различной степени проявляются на разных стадиях обучения, но в целом следует признать, что преимущественно мы учим знаниям и контролируем знания, а реальная производственная деятельность требует не только их, но также умения и навыки или, по крайней мере, хотя бы достаточный уровень осведомлённости студента о необходимых умениях.

Фундаментальные знания, формируемые на начальной стадии инженерного образования безусловно необходимы будущему специалисту. Физика, математика, химия, инженерная графика и другие дисциплины, создающие фундамент для будущей инженерной деятельности и развивающие в мозге систему нейронных связей, часто представляются студентам весьма абстрактными и формальными – нужно выучить и сдать экзамен [16]. Реальное изложение курса и фонд оценочных средств, формируемых преподавателем, также в большей степени нацелены на контроль знаний. О компетенциях, описанных в основной образовательной программе и в рабочей программе дисциплины, как правило не упоминается или, в лучшем случае, речь идёт об умениях выполнять лабораторные работы или типовые задания.

Целью данной работы является попытка использовать детерминированный (не вероятностный) подход к частичной оценке результатов обучения, с использованием простейшей математической модели на примере оценки результата обучения студентов по дисциплине «Физико-химия диэлектрических материалов».

За основу могут быть приняты материалы, опубликованные в статье «Подходы к оценке и

обеспечению качества инженерного образования» [17].

В целом, обеспечение качества инженерного образования предполагает более широкий набор характеристик, чем компетенции, включающие знания, умения и навыки/владения. В этот набор характеристик входит также уровень сформированности у выпускников инженерных программ мировоззрения устойчивого развития, степень развития инженерного мышления и уровень мотивации к самосовершенствованию, получению новых компетенций и труду в выбранной сфере инженерной деятельности.

Этот набор, возможно и не полный, был сформирован с учётом мнения групп экспертов, являющихся представителями образовательного научного и инженерного сообществ из различных сфер инженерной деятельности.

Материалы и методы

Методология выполняемой работы предполагает использование метода дедукции – «от общего к частному» и метода индукции – «от частного к общему».

Метод «от общего к частному» позволяет учесть один из важных девизов ООН, ориентирующих человеческое сообщество на достижение целей устойчивого развития: «думать глобально – действовать локально».

Реализация этого подхода предполагает последовательное движение, в условиях принятых допущений, от общего непротиворечивого понятия «качество инженерного образования» к его составляющим: детализации результатов обучения, их количественной оценки с учётом требуемых уровней результатов обучения, как по основной образовательной программе (ООП) в целом, так и по конкретным дисциплинам в ней входящим. Метод «от частного к общему» позволяет от оценки отдельных составляющих результатов обучения перейти к обобщённому результату обучения и, в конечном итоге, к оценке уровня подготовленности выпускника к успешной профессиональной инженерной деятельности в выбранном направлении.

Выбранная методология предполагает использование системного подхода, методов социологических исследований (опросы, анкетирование), математического моделирования, статистической обработки результатов, а также использования метода экспертного семинара [18].

При организации алгоритма действий и разработке математической модели оценки

результатов обучения студентов по основной образовательной программе и рабочей программы любой из дисциплин, входящих в ООП, авторы следовали следующим принципам и ограничениям:

Принцип целевой подготовки реализуется путём согласования с руководителем ООП, а возможно и с конкретными стейкхолдерами самой цели рабочей программы, результатов обучения, требований к граничным значениям обобщённого показателя результатов обучения по дисциплине, а также к методам и формам их количественной оценки.

Принцип ориентации на измеряемые признаки реализуется путём выбора и использования тех признаков, ориентация на которые позволяет осуществить количественную оценку исследуемого параметра.

Принцип комплексности предполагает, что показатель, характеризующий результаты обучения – сложная комплексная характеристика, при оценке которой должен быть учтён вклад (удельный вес) каждой составляющей в общий итоговый результат.

Принцип единства размерностей реализуется выбором единой шкалы (0 – 1) для оценки уровня достигнутых результатов обучения (общих и частных), обеспечивающей возможность получения сравнимых оценок при проведении корректирующих мероприятий по управлению результатами обучения. Реализация принципа обеспечивается выбором для измерения признаков таких показателей как «доля» и/или «удельное значение», отнесённое к максимальному значению, назначенному руководителем ООП.

Принцип инвариантности обеспечивается возможностью применения системы для количественной оценки результатов обучения конкретного студента, как по отдельной дисциплине, так и в целом по ООП. Также система может использоваться для оценки достижения планируемых результатов обучения группы или потока студентов.

Допущения:

1. Обобщённые результаты обучения по конкретной дисциплине:

планируемый набор компетенций, обозначенных в рабочей программе дисциплины и согласованных с руководителем, стандартом вуза и другими требованиями;

2. В каждой компетенции имеется «знаниевая» и «деятельностная» составляющие результата обучения;

3. Уровень достижения «знаниевой» составляющей оценивается по отношению балла,

полученного студентом на экзамене к максимально возможному (5);

4. Уровень достижения «деятельностной» составляющей оценивается по уровню осведомлённости студента об умениях с возможностью корректировки его оценки преподавателем с учётом результатов студента, демонстрирующего практические умения и навыки.

Обзор литературы

В последние десятилетия наблюдается резкий рост научного и межгосударственного интереса к повышению качества образования, в частности – к повышению академической успеваемости в системе высшего образования. Доказательством этого может служить приверженность Болонскому процессу в Европе, развитие таких масштабных проектов, как Tuning, возрастающий интерес к аккредитации программ ВПО, формирование во многих странах квалификационных рамок и появление многонациональных рейтинговых инициатив, таких как Umap и U-Multirank [19].

С 2000х годов в мировом образовательном сообществе начинается постепенный процесс трансформации традиционной системы оценки академической успеваемости. В системе высшего инженерного образования всё чаще появляются предложения по оценке качества образования с точки зрения ожидаемых результатов обучения и компетенций выпускников, а не предметного содержания образовательных программ. В основе пересмотра и модернизации учебных программ лежат согласованные результаты обучения выпускников, обозначенные национальными и международными аккредитационными агентствами. На международном уровне уделяется большое внимание поиску единства в выборе и формулировании результатов обучения, эта работа ведется органами, занимающимися как профессиональной, так и образовательной аккредитацией: Вашингтонское соглашение (WA), Европейская сеть аккредитации инженерного образования (ENAE), Совет по аккредитации программ в области техники и технологий (ABET), Инженеры Австралии (EA), Агентство по обеспечению качества высшего образования Великобритании (QAA), Процесс Tuning, ЕС и др. [20].

Несмотря на наличие глубокой теоретической базы компетентностного подхода в

образовательном процессе, существует проблема создания и внедрения комплексной системы мониторинга и оценки результатов обучения студентов вуза [21].

Научное сообщество отмечает, что оценивание результатов обучения, в том числе компетенций, является сложной процедурой и требует применения универсальных подходов к созданию системы критериев, показателей, шкал, единиц и инструментов оценивания [22].

Изучение и анализ российского опыта применения различных методик оценки академической успеваемости студентов позволил сформировать перечень наиболее распространенных методов и инструментов оценки (таблица 1).

Как видно из таблицы 1, ряд методов оценки успеваемости, широко применяемых в российской системе ВПО, можно отнести к традиционным методам, которые преимущественно нацелены на оценку «знанияевой», а не «деятельностной» компоненты результатов обучения. Ориентация на формирование и оценку знаний, а не умений и навыков/владений, является одной из главных причин недовольства стейкхолдеров образовательного процесса (в первую очередь – работодателей) качеством подготовки будущих специалистов [26].

Замятин А.М. в своей работе [24] определяет ряд базовых требований к системе объективной и непротиворечивой оценки результатов обучения:

- мониторинг знаний, умений и навыков;
- мониторинг оценки компетенций;
- объективность результатов мониторинга;
- высокий уровень валидности ФГОС;
- сопоставимость приобретенных компетенций и методов контроля будущей профессиональной деятельности выпускников;
- возможность обратной связи (управление процессом обучения);
- обобщение результатов.

Для выполнения этих требований необходимо применение системного подхода при создании механизма оценки результатов обучения. Так, оценочные средства должны обеспечивать мониторинг уровня освоения всех компонентов результатов обучения; оценка должна быть проведена с учетом требований всех ключевых стейкхолдеров образовательного процесса.

Таблица 1 – Методы и инструменты оценки успеваемости студентов вузов РФ [22-25]

№ п/п	Метод, инструмент оценки успеваемости	Краткое описание	Предмет оценки
1	Контрольная работа	Проверка знаний для решения задач определенного типа	Соответствие предполагаемым ответам, правильность алгоритма действий, логика рассуждения, нестандартный подход
2	Коллоквиум	Проверка знаний	Предметные знания, кругозор студента, умение логически выстраивать свой ответ
3	Доклад, публичное выступление	Проверка знаний, мягких (универсальных) навыков – soft skills	Умение презентовать результаты работы, выступать перед аудиторией
4	Эссе	Творческая задача, стимулирует исследовательскую деятельность	Предметные, отвлеченные и методологические знания, исключается элемент случайности
5	Портфолио	Подборка сертифицированных достижений студента, наиболее значимых работ и отзывов на них	Различные аспекты РО в зависимости от применяемых методов оценки Интеграция количественной и качественной оценок деятельности студента
6	Балльно- рейтинговая система	Позволяет проследить объективную динамику освоения РО по дисциплине	Различные аспекты РО в зависимости от применяемых методов оценки
7	Тестирование в LMS	Независимая оценка учебных достижений с применением электронной среды обучения	Различные аспекты РО в зависимости от применяемых методов оценки
8	Кейс-метод	Самостоятельное и творческое решение реальной профессиональной задачи	Знания и осведомленность об умениях (в т.ч. понимание алгоритмов)
9	Метод проектов (проектный метод)	Самостоятельное и/или групповое творческое решение реальной профессиональной задачи, вовлечение в учебный процесс	Знания, осведомленность об умениях, мягкие навыки, в т.ч индивидуальная и групповая работа
10	Педагогические тесты	Тестирование на основе теории педагогических измерений (психометрии, теории IRT, тестологии) с применением математических моделей	Различные аспекты РО в зависимости от содержания и формата тестовых заданий. Позволяют дать наиболее объективные результаты тестирования

Наиболее подходящим инструментом для такой оценки являются педагогические тесты, в основе которых лежит математическая модель, позволяющая провести независимую, объективную оценку. При этом содержание и формат тестовых заданий могут и должны быть разработаны экспертными группами, включающими представителей как образовательного, так и профессионального сообщества. Однако, в настоящее время в российских инженерных школах отсутствует единая система оценки результатов обучения; взаимодействие вузов с работодателями зачастую является формальным; а в образовательной среде проявляется инертность к развитию методов оценки и приверженность устоявшимся системам оценки успеваемости [24].

В то же время международное инженерное образовательное сообщество активно развивает

проекты различного масштаба, направленные на создание системы объективной оценки результатов обучения.

Существенных достижений в этой сфере добились представители системы среднего профессионального образования. Одной из ярких и масштабных инициатив в этой области является WorldSkills – система, направленная на повышение статуса и стандартов профессиональной подготовки и квалификации, в том числе посредством проведения национальных и международных чемпионатов рабочих профессий. С 2017 года в России внедряется проведение государственной итоговой и промежуточной аттестации по программам СПО в формате демонстрационного экзамена WorldSkills. В основе чемпионатов и экзаменов лежат тестовые задания, позволяющие

оценить различные компоненты формируемых компетенций [27].

Среди других международных инициатив по оценке результатов обучения в СПО следует отметить:

- Проект COMET (Развитие и оценка компетенций в СПО) – немецкая инициатива, направленная на комплексную диагностику компетенций студентов СПО. Диагностика проводится на основе тестирования. Тестовые задания разработаны на основе типовых профессиональных задач и включают комплексные предметно-ориентированные задания. Участникам дается 120 минут на выполнение 4 открытых тестовых заданий, ответы на вопросы, связанные с оценкой профессиональной идентичности, а также заполнение анкет с контекстной информацией [28].

- Проект WorkKeys (США), нацеленный на оценку универсальных навыков, необходимых молодым специалистам при первичном трудоустройстве. Проводится в формате компьютерного тестирования. Оценивает владение 11 навыками, в т.ч. математическая грамотность, навык работы с рабочими документами, способность извлекать информацию из графических материалов, навык чтения текстов, коммуникативные навыки и др. Участники, успешно прошедшие тестирование, получают Национальный сертификат готовности к профессиональной деятельности (ACT NCRC). Сертификат признается 22 тыс. компаний в США и учитывается ими при отборе соискателей [29].

В системе высшего профессионального образования одним из значимых проектов является международный проект AHELO «Оценка результатов обучения в высшем образовании», выполняемый под эгидой ОЭСР. Основной целью проекта является поиск критериев оценки, позволяющих проанализировать, что учащиеся знают и могут делать в конце программы обучения, а также в какой степени их навыки улучшились за время обучения [19]. Одним из результатов проекта должна стать не только система оценки индивидуальных результатов обучения студентов, но и база данных ответов студентов, позволяющая проводить сравнительных анализ результатов обучения в конкретных вузах/странах.

Консорциумом было разработано специфическое тестирование, в котором приняли участие 249 вузов в 17 странах и регионах, а инструменты оценки были применены к 4 900 преподавателям и 23000 студентов последнего года обучения по программам бакалавриата [19].

Страны-партнеры проекта и различные международные экспертные группы участвовали в разработке инструментов оценки для трех направлений: общие навыки, экономика и инженерия.

В каждом направлении инструменты оценки включали в себя как тестовые вопросы с несколькими вариантами ответов (*multiple-choice questions*), которые оценивались автоматически, так и вопросы, требующие конструктивных ответов (*constructive response questions*), по которым была необходима ручная оценка командой оценщиков внутри каждой страны. При этом значительное внимание уделялось единобразию в оценке конструктивных ответов и соответствуию их эталонной стандартизированной оценке по каждому вопросу [30].

Вопросы «*Multiple choice*» – простые и сложные вопросы с несколькими вариантами ответов, из которых студент выбирает 1 верный. Этот тип вопросов даёт возможность быстро и эффективно оценить инженерные знания, понимание и осведомленность об умениях [19].

Вопросы «*Constructed response*» подразделяются на 2 типа: а) вопросы, требующие короткого конструктивного ответа (численного, односложного), б) усложненные вопросы, требующие построения графиков, диаграмм, дизайнов конструкций, спецификаций и расширенных письменных ответов. Студентам может быть представлен некий сценарий или контекст, в т.ч. с использованием фотографий, диаграмм, таблиц с уточняющими данными. Учитывая все аспекты сценария, студенты должны ответить на ряд открытых вопросов [19,31].

Стоит отметить, что одна из ключевых проблем при тестировании конструктивного ответа – это время и затраты, связанные с подсчетом баллов. Этот процесс часто включает в себя сложные системы для контроля согласованности и точности оценок [32].

Несмотря на общий положительный результат в части разработки унифицированной системы оценки результатов обучения в рамках проекта AHELO, консорциумом проекта был выделен ряд проблем и рекомендаций, которые следует учесть при доработке системы:

1. Задания на оценку теоретических знаний преобладали, что противоречит задаче оценивать все компоненты результатов обучения холистически;
2. Количество открытых вопросов должно быть сведено к минимуму;
3. При формировании банка заданий теста необходимо обеспечить их связь с реальными

профессиональными задачами;

4. Вопросы должны быть полностью объективны и оцениваться все контекста;

5. Применение единой системы оценки результатов обучения для всех вузов и стран вряд ли целесообразно, учитывая разнообразие миссий вузов и образовательных систем.

Последний тезис подтверждает и открытое письмо от Американского совета по образованию (ACE) с критикой целей проекта. ACE настаивает на том, что подобная система является актуальной, если позволяет провести оценку индивидуальных результатов обучения студента, оценить его прогресс и достижения. Применение же системы для сравнения результатов деятельности вузов является противоречивым [33].

Результаты проведенного анализа лучших практик еще раз демонстрируют, что окончательные и исчерпывающие ответы на современные вызовы в области оценки результатов обучения еще не найдены. Отдельные страны и корпорации активно экспериментируют в поиске новых, нетрадиционных моделей оценки навыков, при этом эти усилия вовсе не означают окончательного отказа от традиционных моделей [12]. Создание комплексных инструментов для объективной и непротиворечивой оценки результатов обучения на основании педагогического тестирования является актуальной и еще нерешенной научно-практической задачей.

Результаты и обсуждение

Алгоритм действий и математический аппарат

Принципы и принятые допущения позволяют выстроить алгоритм действий и алгоритм расчёта для количественной оценки результатов обучения конкретного студента, группы студентов по какой-либо дисциплине.

Последнее даст возможность осуществлять преподавателю анализ своей деятельности по организации учебного процесса по конкретной дисциплине, а также вырабатывать меры по её совершенствованию.

Алгоритм построения системы оценки качества инженерного образования включает следующие действия:

1. Формирование фонда оценочных средств:

– составление базы данных вопросов для экзаменационных билетов («знаниевая» часть), обеспечивающих полный спектр вопросов для проверки знаний студента;

– составление базы данных вопросов для тестовых испытаний студентов, обеспечивающих возможность оценки «деятельностной» составляющей результата обучения¹ – уровня осведомлённости конкретного студента об умениях, на основе оценки его способности и реакции (скорости) выбирать правильный алгоритм действий в рамках изучаемой дисциплины;

– согласование с руководством ООП/со стейкхолдерами состава обобщённых результатов обучения студентов по конкретной дисциплине.

2. Согласование с руководством ООП, со стейкхолдерами (экспертами) методов оценивания и необходимого уровня обобщённого результата обучения студента и/или каждой из его составляющих.

3. Проведение тестовых испытаний студентов в соответствии с принятыми и согласованными методами.

4. Расчёт значений обобщённого результата обучения студента и каждой из его составляющих по дисциплине.

5. Проведение анализа достигнутых уровней обобщённого результата обучения студентов и каждой из его составляющих по дисциплине.

6. Расчёт значения обобщённого результата обучения выпускника с учётом вклада (удельного веса) каждой составляющей.

7. Оценка степени достижения запланированных результатов обучения по конкретной дисциплине на основе сравнения полученного расчётного значения обобщённого результата обучения с требуемым (руководителем ООП, руководителем цикла дисциплины).

Математическая модель оценки результата обучения по конкретной дисциплине

Математическое описание обобщённого результата обучения и его составляющих, по существу, позволяет оценивать, исследовать и анализировать текущие и итоговые результаты обучения по конкретной дисциплине.

В общем виде количественная (0-1) оценка финального реально достигнутого обобщённого результата обучения ($R_{i.r.f}$) конкретного (i)

тестировании. Количество вариантов ответов для каждого вопроса теста не менее 4 (в том числе, как правило, один из них - правильный).

¹ Количество вопросов в базе данных для тестирования должно кратно превышать количество вопросов, предлагаемых конкретному студенту при

студента может быть представлена суммой произведений количественных показателей (0-1) выбранных частных характеристик (составляющих обобщённого результата обучения) на соответственный удельный вес (0-1) каждой из них:

$$1) R_{i.r.f} = \sum K_{i.n.f} * \gamma_n,$$

где $K_{i.n.f}$ – численное (0-1) значение частной (n) характеристики обобщённого результата обучения конкретного студента; γ_n – численное значение (0-1) удельного веса (вклада) n -ной характеристики обобщённого результата обучения конкретного выпускника. Следовательно, всегда численное значение оценки обобщённого результата обучения конкретного выпускника будет лежать в пределах от 0 до 1.

Для решения частных задач, исследователи, если сочтут это более удобным, могут использовать как 10-балльную, так и 100-балльную шкалу, произведя соответствующие арифметические действия. В частном случае, учитывая возможность количественной оценки предложенных выше составляющих обобщённого финального (f) результата обучения (планируемых компетенций с учётом балла конкретного студента по дисциплине (i), уравнение для оценки будет иметь вид:

$$2) C_{i.r.f.\Sigma} = \sum [b_i/5 * \gamma_b + \gamma_c * \sum C_{i.r.f.n}],$$

где $C_{i.r.f.n}$ – численное значение уровня освоения i -тым выпускником n -ной компетенции; b_i – балл, набранный студентом по конкретной дисциплине к моменту тестирования; γ_b, γ_c – соответственно, удельные веса вклада показателей в общий результат; $\gamma_b + \gamma_c = 1$.

Численное значение, характеризующее уровень освоения i -тым студентом n -ной компетенции ($C_{i.r.f.n}$) может быть определено по результатам тестирования и рассчитано по формуле:

$$3) C_{i.r.f.n} = 0,6q_{i.n.test}(T/t_{i.n}),$$

где $q_{i.n.test}$ – доля правильных ответов, данных i -тым студентом при прохождении теста на уровень освоения n -ной компетенции, (0-1); 0,6 – нормирующий коэффициент; T – время, установленное для тестирования; $t_{i.n}$ – время, затраченное экзаменуемым на ответы.

Границные условия:
выражение 3) справедливо при условиях:

$(0,6T) \leq t_{i.n} \leq T$. При любых значениях $t_{i.n} \leq (0,6T)$, всегда $t_{i.n} = 0,6T$.

Условия проведения тестирования

Предъявление одновременно всех вопросов, с ограничением времени ответа.

Опираясь на коллективное мнение группы экспертов (всего более 40 человек), представляющих промышленность и научно-образовательное сообщество, можно считать, что для выяснения степени освоения выпускниками инженерных программ запланированных компетенций достаточными и необходимыми являются следующие условия проведения тестирования:

- общее число планируемых и контролируемых компетенций – в соответствии с рабочей программой дисциплины;
- оптимальное количество вопросов, для выяснения степени освоения каждой компетенции – 15;
- общее число вариантов ответов, предлагаемых для выбора – не менее 4;
- соотношение числа вопросов «на знания»/«на умения» – от 0,2/0,8, до 0,5/0,5, в зависимости от характера компетенции и дисциплины;
- доля открытых вопросов в общем числе предлагаемых вопросов – не более 10% (или могут не включаться в предлагаемый перечень);
- время, предоставляемое для ответов на вопросы теста, содержащего 15 вопросов – 15 минут (одна минута на 1 вопрос).

Рекомендуется тестирование проводить по каждой компетенции отдельно.

Опыт исследований и оценки уровня достижения планируемых компетенций студентами 1 – 4 курсов различных направлений подготовки ТПУ показал, что наиболее сложным для преподавателей является составление перечня вопросов для тестирования и оценки «деятельностной» составляющей образования [34]. В связи с этим в данной статье мы приводим пример формирования базы данных вопросов по дисциплине «Физико-химия диэлектрических материалов», лежащей на границе между дисциплинами естественно-научного цикла и дисциплинами профессионального цикла по ООП, реализуемой в Томском политехническом университете по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроизоляционные системы, высоковольтная и кабельная техника», специализация «Электроизоляционная и кабельная техника», магистратура.

Пример составления вопросов для тестирования по дисциплине «Физико-химия диэлектрических материалов».

Общий объём часов – 216, в том числе:

- лекции 16,
- практические занятия 24,
- лабораторные работы 24,
- самостоятельная работа 152.

Длительность изучения дисциплины – 1 семестр.
Общее количество кредитов – 6.

Компетенция, достижение которой запланировано:

1. Способен применять полученные знания о физико-химических свойствах и процессах в электротехнических материалах при разработке и эксплуатации электротехнических изделий.

Компетенция имеет следующие составляющие результатов обучения (дескрипторы компетенции):

Владение – Владеет навыками определения технологических, механических и электрофизических характеристик электроизоляционных материалов и систем;

Умения – Умеет проводить анализ процессов, протекающих в диэлектрических материалах в области слабых и сильных электрических полей;

Знания – Знает номенклатуру и свойства электротехнических материалов, физические состояния полимеров и сущность явлений и процессов в диэлектриках, основы технологии переработки пластмасс и резин.

Общее количество вопросов 60. Для тестирования студенту предлагается 15 вопросов, случайно выбранных из базы данных вопросов. Время тестирования – 15 минут.

Пример вопросов и ответов по оцениваемой компетенции

Владения/навыки: «Владеет навыками определения технологических, механических и электрофизических характеристик электроизоляционных материалов и систем».

1. Необходимо измерить удельное объёмное сопротивление диэлектрика. Какой из вариантов вы выберете?

✓ подготвлю образцы диэлектрика, нанесу на поверхность измерительные электроды квадратной формы, измерю площадь образца, рассчитаю электрическое сопротивление, как $R = U/I$;

✓ подготвлю образцы диэлектрика, нанесу на поверхность измерительные электроды круглой формы, измерю площадь образца, рассчитаю электрическое сопротивление, как $\rho = R \cdot S/d$;

✓ подготвлю образцы диэлектрика, нанесу на поверхность измерительные электроды круглой формы, охранное кольцо, измерю площадь и толщину образца, рассчитаю удельное электрическое сопротивление, как $\rho = U \cdot R \cdot S/d$;

✓ подготвлю образцы диэлектрика, нанесу на поверхность измерительные электроды круглой формы, измерю площадь и толщину образца, рассчитаю удельное электрическое сопротивление, как $\rho = R \cdot S/d$.

2. Какой комплект инструментов и оборудования Вам понадобится, для определения tgd диэлектрика?

✓ электронная ячейка с охранным кольцом и измерительный *LCR* мост;

✓ электронная ячейка с охранным кольцом и измерительные приборы: амперметр, вольтметр, ваттметр, источник питания;

✓ электронная ячейка без охранного кольца и измерительный *LCR* мост;

✓ изготовленная катушка индуктивности для помещения образца и измерительный *LCR* мост.

3. Каков порядок действий при испытании на электрическую прочность образцов твердых диэлектриков в высоковольтной лаборатории?

✓ изучить правила ТБ при работе на высоковольтной установке. Подготовить образец диэлектрика. Определить среднюю толщину образца. Разместить образец в высоковольтной ячейке. Провести серию пробоев (5-10 образцов). Определить среднее напряжение пробоя;

✓ подготовить образец диэлектрика. Определить среднюю толщину образца. Разместить образец в высоковольтной ячейке. Провести серию пробоев (5-10 образцов). Определить напряжение пробоя;

✓ подготовить образец диэлектрика. Определить среднюю толщину образца. Разместить образец в высоковольтной ячейке. Провести серию пробоев (5-10 образцов). Определить среднее напряжение пробоя;

✓ изучить правила ТБ при работе на высоковольтной установке. Подготовить образец диэлектрика. Определить среднюю толщину образца. Разместить образец в высоковольтной ячейке. Провести серию пробоев (5-10 образцов). Определить среднее напряжение пробоя.

Умения: «Умеет проводить анализ процессов, протекающих в диэлектрических материалах в области слабых и сильных электрических полей».

1. Причины нагрева диэлектрика при помещении его в электрическое поле

✓ диэлектрические потери на сквозную электропроводность, медленные виды

поляризации и поляризация газовых включений (в сильных полях);

✓ диэлектрические потери на сквозную электропроводность;

✓ медленные виды поляризации;

✓ поляризация газовых включений (в сильных полях).

2. В какой последовательности Вы будете измерять удельную электропроводность почвы?

✓ взять кювету из диэлектрического материала $14 \times 9 \times 4$ см, насыпать почву, вставить 2 металлических пластинчатых электрода 9×4 см по краям кюветы, собрать цепь из источника постоянного тока низкого напряжения (до 10 вольт), вольтметра, миллиамперметра, рассчитать электропроводность почвы, измерить влажность, при расчете учесть объем кюветы;

✓ взять кювету из диэлектрического материала $14 \times 9 \times 4$ см, насыпать почву, вставить 2 металлических пластинчатых электрода 9×4 см, омметр с пределом измерения от 0 до 10 килоом. Разделить единицу (число) на величину сопротивления почвы;

✓ собрать цепь из источника переменного тока, поставить ваттметр, взять кювету из диэлектрического материала любого размера, насыпать почву, вставить 2 металлических электрода, рассчитать электропроводность почвы, при расчете учесть объем кюветы;

✓ собрать цепь из источника переменного тока, поставить ваттметр, взять кювету из диэлектрического материала любого размера, насыпать почву, вставить 2 металлических электрода, рассчитать электропроводность почвы, при расчете учесть объем кюветы.

3. В какой последовательности Вы будете изготавливать термопару?

✓ взять проволоку из константана и меди, сделать скрутку, расплавить газовой горелкой обе проволоки, тщательно полностью заизолировать проводники, подключить прибор → готово к использованию;

✓ взять проволоку из константана и меди, сделать скрутку, расплавить электрической дугой концы обеих проволок, подключить прибор → готово к использованию;

✓ взять проволоку из константана и меди, сделать скрутку, тщательно полностью заизолировать проводники, подключить прибор → готово к использованию;

✓ взять проволоку из хромеля и алюмеля, сделать скрутку, расплавить газовой горелкой обе проволоки, тщательно полностью заизолировать проводники, подключить прибор → готово к использованию;

✓ взять проволоку из алюминия и меди, сделать скрутку, расплавить электрической дугой концы обеих проволок, подключить прибор → готово к использованию.

Знания: «Знает номенклатуру и свойства электротехнических материалов, физические состояния полимеров и сущность явлений и процессов в диэлектриках, основы технологии переработки пластмасс и резин».

1. Какому из нижеперечисленных диэлектриков для изоляторов линии электропередач, работающей во влажной среде, Вы отдаадите предпочтение?

✓ кристалл поваренной соли; конденсаторная бумага; неглазурированный фарфор; глазурированный фарфор;

✓ неглазурированный фарфор; глазурированный фарфор; конденсаторная бумага; кристалл поваренной соли;

✓ глазурированный фарфор; неглазурированный фарфор; конденсаторная бумага; кристалл поваренной соли;

✓ конденсаторная бумага; кристалл поваренной соли; неглазурированный фарфор; глазурированный фарфор.

2. За счет чего «стареет» трансформаторное масло?

✓ истекает срок годности;

✓ происходит окисление атмосферным кислородом;

✓ масло «прокисает»;

✓ масло разлагается под действием магнитного поля трансформатора.

3. Что показывает относительная диэлектрическая проницаемость?

✓ на сколько диэлектрик увеличивает заряд конденсатора по сравнению с вакуумом;

✓ прозрачность материала;

✓ механическую вязкость по сравнению с вакуумом;

✓ электрическую прочность по сравнению с вакуумом.

Открытый вопрос.

Как называется прибор, которым можно измерить ёмкость и тангенс угла диэлектрических потерь?

Пример ответа: Куметр (прибор, позволяющий измерять добротность колебательного контура, индуктивность катушек, ёмкость и добротность конденсаторов. Добротность диэлектрической изоляции представляет собой величину, обратную $\operatorname{tg} \delta$, т.е. $Q = 1 / \operatorname{tg} \delta$.)

Заключение

Проведённый анализ применения компетентностного подхода при организации учебного процесса, обеспечивающего подготовку специалистов для работы в сфере техники и технологии, позволил установить, что в процессе подготовки будущих инженеров наблюдается смещение фокуса внимания в сторону формирования «знанияевой» составляющей инженерного образования. Недостаточно внимания уделяется «деятельностной» составляющей образования, что негативно сказывается на качестве подготовки специалистов, приводит к необходимости их «доучивания» на местах работы, удлинению срока их адаптации к условиям реального производства.

Высказано предположение, что одним из первых шагов по исправлению сложившегося положения является совершенствование системы контроля компетенций, запланированных к освоению в процессе обучения в вузе, в частности при преподавании конкретных дисциплин.

Наличие методов такого контроля позволит выявить и устранить недостатки в организации учебного процесса и обеспечить смещение его в сторону «деятельностной» составляющей инженерного образования.

Предложена математическая модель оценки уровня достижения запланированных компетенций, позволяющая осуществлять количественную оценку результатов обучения, включая его «знанияевую» и «деятельностную» составляющие. Также эта модель позволит преподавателям оценивать результативность своих усилий по достижению поставленных целей и предпринимать меры по повышению уровня подготовки студентов по соответствующим конкретным дисциплинам.

Приведённый пример формирования элементов фонда оценочных средств по дисциплине «Физико-химия диэлектрических материалов» может служить основой для проектирования таких фондов как по дисциплинам естественно-научного цикла, так и по профильным дисциплинам.

Литература

1. Graham R. The global state of the art in engineering education, Massachusetts Institute of Technology (MIT) Report. – Massachusetts, USA, 2018. – 162 с.
2. Patil, A. and Gray P. Engineering Education Quality Assurance: A Global Perspective. – NY: Springer, 2009. – 316 p.
3. Огородова Л. М., Кресс В. М. и Похолков Ю. П., Инженерное образование и инженерное дело в России: проблемы и решения // Инженерное образование. – 2012. – № 11. – С. 18-23.
4. Чанько А.Д. и Баснер А.А., Корпоративные университеты: анализ деятельности в международных исследованиях // Российский журнал менеджмента. – 2015. – Т. 13. – № 3. – С. 79-110.
5. Kolmos, A., Hadgraft, R. and Holgaard, J. Response strategies for curriculum change in engineering // International Journal of Technology and Design Education. – 2015. – 26.
6. Small, L., Shacklock, K. and Marchant, T. Employability: a contemporary review for higher education stakeholders // Journal of Vocational Education & Training. – 2018. – 70:1. – P. 148-166.
7. Adam, S. F. A consideration of the nature, role, application and implications for European education of learning outcomes at the local, national and international levels. – 2004.
8. European Commission. Using learning outcomes – European Qualifications Framework series: note 4. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. – 48 p.
9. Schwab K., Insight Report: The Global Competitiveness Report 2019 // World Economic Forum. – Geneva: SRO Kundig, 2019. – 648 р.
10. Похолков Ю.П., Качество подготовки инженерных кадров глазами академического сообщества // Инженерное образование. – 2014. – № 15. – С. 18-25.
11. Allan, J. Learning outcomes in higher education // Studies in Higher Education. – 1996. – 21(1). – Р. 93–108.
12. Дудырев Ф. Ф., Фрумин И. Д., Мальцева В. А., Лошкарева Е. П. и Татаренко Е. А. Новые возможности WorldSkills для сопоставимой оценки результатов в профессиональном образовании // Современная аналитика образования. – М.: Институт образования НИУ ВШЭ, 2019. – 47 с.
13. Crawley, E., Malmqvist, J., Ostlund, S., Brodeur, D. and Edstrom, K. Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach. – Springer Cham, 2014. – 311 р.
14. Глухарева, С. В., Немирович-Данченко, М. М., Давыдова, Е. М., и Буинцев, Д. Н. Метод группового проектного обучения в системе подготовки кадров нового поколения // Современные научноемкие технологии. – 2020. – 4. – С. 110-114.
15. Джабиев, О.А., Пономарева А.В. Решение проблемы подготовки инженеров нефтегазовой отрасли на базе Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Heriot Watt // Интеллектуальные энергосистемы: труды IV Международного молодёжного форума, 10-14 октября 2016 г., г. Томск. – 2016. – 3. – С. 273-277.

16. Молдабекова М.С., Федоренко О.В. и др. Интегрированность знаний по базовой дисциплине «Физика» и профилирующим дисциплинам как средство реализации практикоориентированного обучения студентов // Вестник. Серия Физическая. – 2019. – Том 70. – №. 3. – С. 92-99.
17. Похолков Ю. П. Подходы к оценке и обеспечению качества инженерного образования // Инженерное образование. – 2022. – № 31. – С. 93-106.
18. Толкачева, К.К. Экспертный семинар как форма реализации целей проблемно-ориентированного обучения специалистов в области техники и технологии: автореферат дис. ... кандидата педагогических наук: 13.00.08 / Толкачева Ксения Константиновна. – КНИТУ, Казань, 2015. – 24 с.
19. Tremblay K., Lalancette D. and Roseveare D. Assessment of higher education learning outcomes: AHELO feasibility study report. – OECD, 2012. – Vol. 1. – 270 p.
20. Coates H., Richardson S., Pearce J. and Fraillon J. Group of national experts on the AHELO feasibility study: Engineering assessment framework: AHELO feasibility study. – OECD, 2011. URL: http://works.bepress.com/julian_fraillon/50 (accessed 09.12.2022)
21. Байденко В.И. Компетентносный подход к проектированию государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (методологические и методические вопросы): Методическое пособие. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2005. – 114 с.
22. Алешугина Е.А., Ваганова О.И., Прохорова М.П. Методы и средства оценивания образовательных результатов студентов вуза // Проблемы современного педагогического образования. – 2018. – № 59-3.
23. Смирнова Ж.В., Красикова О.Г. Современные средства и технологии оценивания результатов обучения // Вестник Мининского университета. – 2018. – №3 (24).
24. Замятин А. М. Система оценки компетенций студентов ВПО. Обзор достижений и нерешенных задач // Молодой ученый. – 2012. – № 5 (40). – С. 418-420.
25. Сакипова Ш.Е. Эффективность новых образовательных технологий в преподавании физики // Вестник. Серия Физическая (ВКФ). – 2015. – Т. 53. – №. 2. – С. 132-136.
26. Материалы экспертных семинаров и тренингов АИОР [Electronic resource]. URL: <http://www.aeer.ru/events/ru/trainings.htm> (accessed 09.12.2022)
27. WorldSkills Russia [Electronic resource]. – URL: <https://worldskills.ru/?ysclid=lbty2srhal457429040> (accessed 14.11.2022)
28. Rauner F., Heinemann L., Maurer A., Haasler B., Erdwien B. and Martens T., Competence Development and Assessment in TVET (COMET) Theoretical Framework and Empirical Results.– Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013. – Vol. 16. DOI: 10.1007/978-94-007-4725-8
29. Anderson S., Harris R., Fluharty M. and McMahon J., ACT WorkKeys Solutions 101 // ACT Workforce Summit Pre-Conference. ACT Workforce Summit. – 2018.
30. Assessment of Higher Education Learning Outcomes Feasibility Study Report : Data Analysis and National Experiences. – OECD, 2013. – Vol. 2. – 195 p.
31. Livingston S. Constructed-Response Test Questions: Why We Use Them, How We Score Them // R&D Connections 11. – Educational Testing Service. – 2009.
32. Pearce. J., Assessing vocational competencies in civil engineering: lessons from AHELO for future practice // Empirical Res Voc Ed Train. – 2015. – 7. – P. 1-15. DOI:10.1186/s40461-015-0016-6
33. American Council on Education and Universities Canada. Joint letter about the AHELO Main Study. – May 7, 2015.
34. Похолков Ю.П., Муравлев И.О., Жадан В.А., Корнева О.Ю., Червач М.Ю., Климова Г.Н., Леонова Л.А., Максимова Ю.А., Першина А.А., Савинова О.В., Степанов С.А. Комплексный подход к оценке уровня освоения студентами запланированных компетенций // Инженерное образование. – 2022. – 31. – С. 46-57.

References

1. R. Graham, The global state of the art in engineering education, Massachusetts Institute of Technology (MIT) Report, (Massachusetts, USA, 2018), 162 p.
2. A. Patil, A. and P. Gray, Engineering Education Quality Assurance: A Global Perspective, (Springer NY, 2009), 316 p.
3. L.M. Ogorodova, V.M. Kress and Yu. P. Pokholkov, Inzenernoye obrazovanie, 11, 18-23 (2012). (in Russ.)
4. A.D. Chanko and A.A. Basner, Rossiiskii zhurnal menedzhmenta, 13 (3), 79-110 (2015). (in Russ.)
5. A. Kolmos, R. Hadgraft, R. and J. Holgaard, International Journal of Technology and Design Education, 26 (2015).
6. L. Small, K. Shacklock and T. Marchant, Journal of Vocational Education & Training, 70:1, 148-166 (2018).
7. S.F. Adam, A consideration of the nature, role, application and implications for European education of employing learning outcomes at the local, national and international levels, (2004).
8. EU. Using learning outcomes - European Qualifications Framework series: note 4, (Luxembourg: Publications Office of the EU, 2011), 48 p.

9. K. Schwab, *Insight Report: The Global Competitiveness Report 2019*, World Economic Forum, (Geneva: SRO Kundig, 2019), 648 p.
10. Yu. P. Pokholkov, *Inzhenernoye obrazovanie*, 15, 18-25 (2014). (in Russ.)
11. J. Allan, *Studies in Higher Education*, 21(1), 93-108 (1996).
12. F. Dudyrev, I. Frumin, V. Maltseva, E. Loshkareva and E. Tatarenko, *Novye vozmozhnosti WorldSkills dlya sопostavimoi otsenki rezul'tatov v professionalnom obrazovanii*, (Sovremennaya analitika obrazovaniya, Institut obrazovaniya NIU VSHE, 2019), 47 p. (in Russ.)
13. E. Crawley, J. Malmqvist, S. Ostlund, D. Brodeur and K. Edström, *Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach*, (Springer Cham, 2014), 311 p.
14. S. Glukhareva, M. Nemirovitch-Danchenko, Ye. Davyidova and D. Buintsev, *Sovremennye naukoyemkie tekhnologii*, 4, 110-114 (2020). (in Russ.)
15. O. Dzhabbiiev and A. Ponomareva, Proc. Intellektualnyie energosistemy: trudy IV Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma (Tomsk, 10-14 October, 2016), 273-277. (in Russ.)
16. Moldabekova M.S. et al., *Recent Contributions to Physics* (Rec.Contr.Phys.), 70 (3), 91-99 (2019). (in Russ.)
17. Yu. Pokholkov, *Inzhenernoye obrazovanie*, 31, 93-106 (2022). (in Russ.)
18. K. Tolkacheva, *Expernyii seminar kak forma realizatsii tselei problemno-orientirovannogo obucheniya spetsialistov v oblasti tekhniki I tekhnologii, avtoreferat dissertatsii*, (KRNTU, Kazan, 2015), 24 p. (in Russ.)
19. K. Tremblay, D. Lalancette and D. Roseveare, *Assessment of higher education learning outcomes: AHELO feasibility study report*, vol. 1, (OECD, 2012), 270 p.
20. H. Coates, S. Richardson, J. Pearce and J. Fraillon, *Group of national experts on the AHELO feasibility study: Engineering assessment framework* (OECD, 2011).
21. V. Baidenko, *Competence-based approach to the design of state educational standards of higher professional education (methodological and methodological issues): Methodical manual*. (Research Center for Quality problems of training specialists, Moscow, 2005), 114p. (in Russ.)
22. E. Alyoshugina, O. Varganova and M. Prokhorova, *Problemyi sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya*, 59-3 (2018). (in Russ.)
23. Zh. Smirnova and O. Krasikova, *Vestnik Mininskogo universiteta*, 3 (24) (2018). (in Russ.)
24. A. Zamyatin, *Molodoi uchenyi*, 5 (40), p.418-420 (2012). (in Russ.)
25. Sh. Sakipova, *Recent Contributions to Physics* (Rec.Contr.Phys.), 53 (2), 132-136 (2015). (in Russ.)
26. <http://www.aeer.ru/events/ru/trainings.htm> – Materials of expert seminars and trainings of AEER (accessed 09.12.2022) (in Russ.)
27. <https://worldskills.ru/?ysclid=lbty2srhal457429040> – WorldSkills Russia (accessed 14.11.2022)
28. F. Rauner, L. Heinemann, A. Maurer, and B. Haasler, *Competence Development and Assessment in TVET (COMET)*, vol. 16, (Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013), 170 p.
29. S. Anderson, R. Harris, M. Fluharty and J. McMahon, *ACT WorkKeys Solutions 101*, (ACT Workforce Summit Pre-Conference, ACT Workforce Summit, 2018).
30. AHELO Feasibility Study Report: Data Analysis and National Experiences, Vol. 2, (OECD, 2013), 195p.
31. S. Livingston, *Constructed-Response Test Questions: Why We Use Them, How We Score Them* (R&D Connections 11, Educational Testing Service, 2009).
32. Pearce, J. *Empirical Res Voc Ed Train*, 7, 1-15 (2015).
33. ACE and Universities Canada, *Joint letter about the AHELO Main Study*, (May 7, 2015).
34. Yu. Pokholkov et al., *Inzhenernoye obrazovanie*, 31, 46-57 (2022). (in Russ.)

Г.К. Наурызбаева^{1*} , Г.Л. Габдуллина² 

¹Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Казахстан, г. Алматы

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: N_G.K@mail.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ СРС ПО КУРСУ ФИЗИКИ В УСЛОВИЯХ ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

В данной статье излагаются пути улучшения организации самостоятельной работы студентов (СРС) университета. Инновационное обучение – это использование новейших информационных технологий во всем дидактическом комплексе информационного обеспечения предмета изучения. Инновационная модель обучения физике в высшей школе включает методологически структурированную информацию, представленную в виде одного из видов инфосферы – системы взаимосвязанных и взаимообусловленных учебников и других средств образовательной деятельности (модульных программ, электронных лекций, а также различных методических пособий). В новых условиях образовательной деятельности увеличения объема и усиления роли самостоятельной работы студентов в учебном процессе обучающиеся получают и осваивают порой только методическую информацию на соответствующем уровне. Для освоения изучаемого материала на регулярной основе студенту необходимо работать долгое время (месяцами), и только квалифицированный преподаватель, знающий психологические особенности процесса обучения и владеющий методикой обучения, поможет сэкономить время студента путём преобразования профессиональных знаний педагогов в образовательные знания. В работе показаны виды и этапы выполнения аудиторной, внеаудиторной СРС по физике, а также пути повышения эффективности и качества учебного труда студентов.

Ключевые слова: университет, инновационное обучение, самостоятельная работа студента, бакалавр, индивидуальные задания, физика.

G.K. Nauryzbayeva¹, G.L. Gabdullina²

¹G. Daukeev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Kazakhstan, Almaty

²Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: N_G.K@mail.ru

Organization of the IWS on the course of physics under conditions technical university

The article outlines ways to improve the organization of independent work of university students. Innovative education is the use of the latest information technologies in the entire didactic complex of information support for the subject. The innovative model of teaching physics in higher education includes methodologically structured information presented in the form of one of the types of the infosphere - a system of interrelated and interdependent textbooks and other means of educational activity (modular programs, electronic lectures, various methodological aids). In the new conditions of increasing the volume and strengthening the role of students' independent work in the educational process, students receive and master only methodological information at the appropriate level. To master the material on a regular basis, a student needs to work for months, and only a qualified teacher who knows the psychological characteristics of the learning process and owns the teaching methodology will help save the student's time by transforming the professional knowledge of teachers into educational knowledge. The paper shows the types and stages of performing classroom, extracurricular IWS in physics, as well as ways to improve the efficiency and quality of students' educational work.

Key words: university, innovative education, student's independent work, bachelor's degree, individual tasks, physics.

Г.Қ. Наурызбаева^{1*}, Г.Л. Габдуллина²

Ғ. Дәүкеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан, Алматы қ.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: N_G.K@mail.ru

Техникалық университет жағдайында физика курсы бойынша СӨЖ үйымдастыру

Мақалада жоғары оқу орындары (ЖОО) студенттерінің өзіндік жұмысын үйымдастыруды жетілдіру жолдары көрсетілген. Инновациялық білім беру – бұл пәнді ақпараттық қамтамасыз етудің барлық дидактикалық кешенінде соңғы жетістіктерге негізделген ақпараттық технологияларды қолдану. Жоғары оқу орындарында физика пәнін оқытудың инновациялық моделі ақпараттық сфера (инфосфера) түрлерінің бірі – өзара байланысты оқулықтар жүйесі және оқу қызметінің, басқа құралдары (модульдік бағдарламалар, электронды дәрістер, сондай-ақ әртүрлі әдістемелік құралдар) түрінде ұсынылған әдістемелік құрылымды ақпаратты қамтиды. Оқу-тәрбие процесінде студенттердің өзіндік жұмыстарының көлемін ұлғайту және рөлін күшетудің жаңа жағдайында студенттер тиісті деңгейде тек әдістемелік ақпаратты алып, менгереді. Оқу материалды жүйелі түрде менгеру үшін студентке бірнеше уақыт (айлар) бойы жұмыс істеу қажет, оқу процесінің психологиялық ерекшеліктерін білетін және оқыту әдістемесін менгерген білікті оқытушы ғана мұғалімдердің, кәсіби білімін терең білімге айналдыру арқылы студенттің уақытын үнемдеуге көмектеседі. Жұмыста физикадан аудиториялық, СӨЖ орындау түрлері мен кезеңдері, сонымен қатар студенттердің оқу жұмысының тиімділігі мен сапасын арттыру жолдары көрсетілген.

Түйін сөздер: университет, инновациялық білім беру, студенттің өзіндік жұмысы, бакалавриат, жеке тапсырмалар, физика.

Введение

Современное научно-педагогическое знание способствует создать и выполнять задачи, способствующие повышению качества образовательных услуг в высшей школе. Особенность этой деятельности состоит в том, что её результатом являются специалисты, каждый из которых в идеале является самоорганизующейся и саморазвивающейся личностью, имеющейся потребность в знаниях и умениях, необходимых для их осуществления последующей профессиональной деятельности [1].

Несмотря на успехи во внедрении новых технологий обучения в образовательный процесс, остается много нерешенных задач, связанных с содержательно-методическими аспектами образования и их взаимодействием, и гуманистической направленностью обучения: ориентация на личность студента, возможность выбора индивидуального способа получения знаний с учётом потребностей студента, то есть взаимная адаптация студента и учебной среды [2].

В настоящее время данная тема стала более требуемой по причине необходимости развития модели обучения физике согласно новыми условиями, что станет вероятным благодаря применению современных подходов обучения. Такая модель была авторами создана кафедре космической инженерии Алматинского

университета энергетики и связи им. Г. Даукеева [3].

Главное и самое значимое в инновационном образовании – это совершенствование индивидуальных возможностей на основе знаний и самообразования. Это личностно-направленное обучение. Важной целью улучшении модели и создания технологии ее реализации является создание отдельной сферы обучения со структурным и содержательным единством, стимулирующим личностный рост студентов и формирующим знания и умения, которые обеспечивают выполнение функциональных задач в будущей профессиональной деятельности в выбранной области [4-6].

Цель статьи – обсуждение и развитие инновационных подходов к организации самостоятельной работы студентов технического вуза при обучении физике. Инновационное обучение призвано предоставить основательность и достоверность обучения [7]. Основательность держится, в первую очередь, на целостном взгляде на современную научную картину мира [8-10].

Методология и методы исследования

Преподавание физики (как и других предметов) должно быть достаточно фундаментальным, чтобы студент мог продолжать чтобы студент мог продолжать обучение самостоятельно. Суть фундаментализации

состоит не в овладении сложнейшими законами и теориями физики, а в создании системы «понимания», позволяющей студенту найти свои способы обучения, образовательные шаги [11]. Реальность обучения требует отчёта базового уровня образования студента и создания условий для его повышения до необходимого уровня. Для этого необходима гибкая программа курса с минимальным и максимальным объёмом материала. При разработке содержания необходимо дать чёткое представление о том, насколько будущий инженер-бакалавр должен быть знаком с различными научными идеями и теориями. В контексте вышеизложенного становится понятно, что одной из важных задач педагогов является наполнение учебной среды конкретным предметным содержанием. Не допускается создавать какие-либо «урезанные курсы физики». Отбор материала и его структурирование должны осуществляться в соответствии с целями обучения, которые иерархически устанавливаются в единстве его содержания и процессуальных аспектов. То, сейчас называется самостоятельной работой студента по усвоению теоретического материала, является в основном формализмом: студент может самостоятельно прочитать текст, написать формулы, но он вряд ли поймёт и научится работать с этим материалом – сделать его "своим".

Качество преподавания предмета, таким образом, отражается в комплексе важных признаков, связанных с удовлетворением потребности обучающихся в методически структурированной учебной информации [12-14]. Эффективной формой представления учебной информации по предмету может быть электронная информационная модель, способная в полной мере отображать содержание обучения по конкретному предмету. Эта модель должна включать текст и гипертекст, упорядоченный учебный материал, систему контрольных тестов (для самоконтроля), учебники и методические рекомендации. Массив информации, организованный в виде шаблона, позволяет студенту легко

ориентироваться в учебном материале и быстро находить то, что ему нужно.

Одним из трудоёмких компонентов модели обучения может быть блок контроля и оценки результатов обучения, коррекции учебного поведения [15]. Здесь, наряду с существующей системой текущих и промежуточных контрольных заданий, тестов, необходимо разработать дополнительные средства объективной и неформальной оценки уровня сформированности необходимых знаний и умений студентов, актуальности результатов.

Так, например, при организации самостоятельной работы студентов по предмету физики, нужно ввести активные отношения между студентом и преподавателем. Уровень понимания и усвоения материала определяется только необходимым для студента диалогом. Студент должен научиться «рассказывать» материал, доказывать его, отстаивать свою позицию.

Между тем, аудиторная самостоятельная работа выполняется студентами на лекционных, семинарских и лабораторных занятиях, и, следовательно, учитывая все её формы, цели, отбирая учебную и научную информацию, продумывая роль студента в этом процессе и своё участие в нём, преподаватель заранее должен выстроить систему самостоятельной работы. Типы и этапы СРС по физике приведены на рисунке 1.

Вместе с тем, внеаудиторная СРС по курсу физики включает (рисунок 2).:

- а) самостоятельное изучение отдельных тем теоретического материала;
- б) самостоятельное выполнение индивидуальных заданий (расчетно-графических работ);
- в) выполнение, по желанию, творческих заданий научно-исследовательской работы студента (НИРС).

Повышение эффективности и качества учебного труда студентов предполагает:

- а) разработку необходимого информационно-методического обеспечения;
- б) обеспечения консультационной помощью преподавателя, а также контроль успешности выполнения заданий [16].

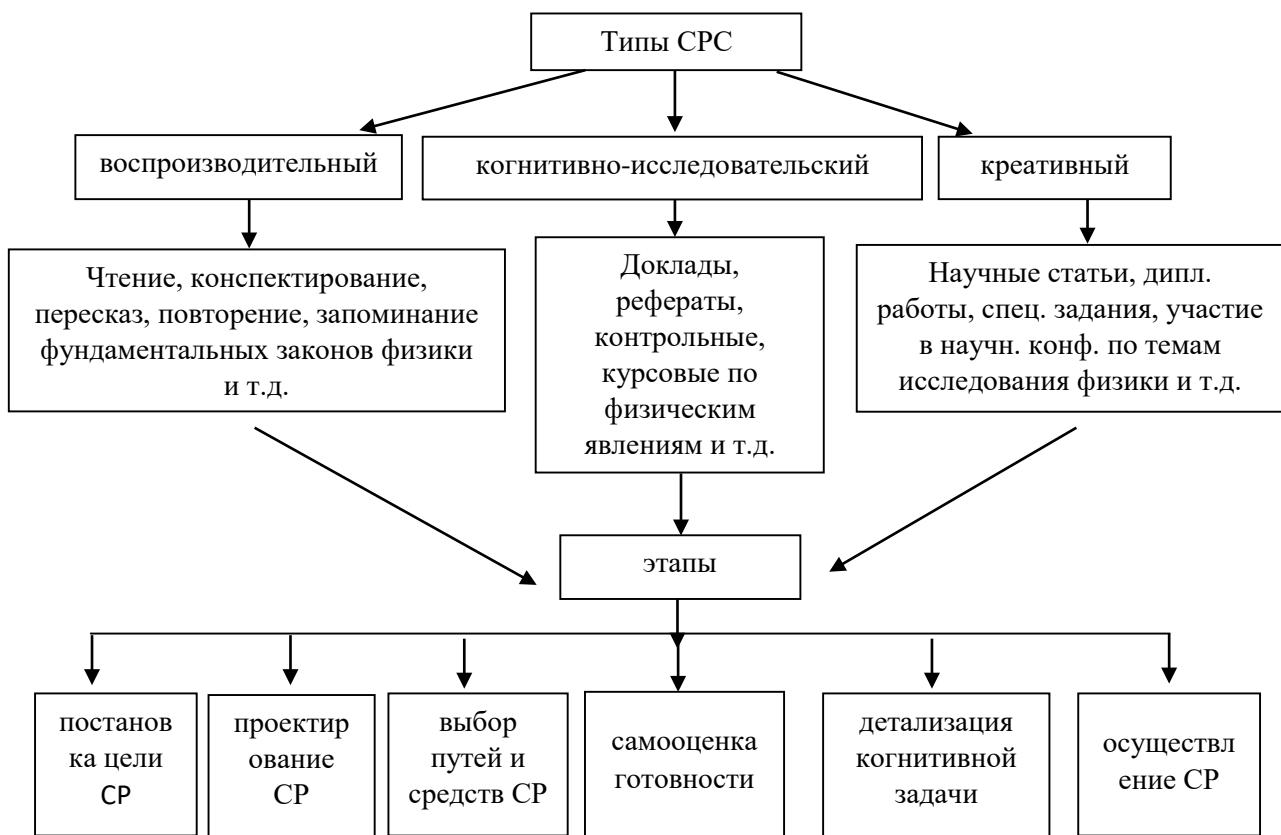


Рисунок 1 – Виды и этапы самостоятельной работы по физике



Рисунок 2 – Осуществление внеаудиторной СРС по физике

Результаты и обсуждение

Разработанное информационно-методическое обеспечение включает руководство по курсу физики (по направлениям изучения), содержащее информацию по темам каждого практического и лабораторного занятий; варианты заданий расчётно-графических работ (РГР); рекомендуемых тем для самостоятельного изучения; вопросы промежуточного и итогового контроля.

При разработке заданий были заданы критерии полноты, всесторонности и системности, то есть по своему содержанию задания должны охватывать весь учебный материал, а по своему характеру – соответствовать различным уровням учебно-познавательной деятельности.

Кроме того, дифференциация самостоятельной работы основана на выделении дидактических целей обучения, и осуществляется посредством разработки системы индивидуальных учебных заданий [17-19].

В процессе защиты РГР особое внимание уделяется овладению методами решения на основе широкого обобщения, когда каждая задача решается как типовая. Студенты учатся выделять ключевые элементы теории и опираться на них при выработке мысленного представления заданной физической ситуации, использовать метод аналогий. Устное собеседование в процессе защиты РГР нацелено на выработку у студентов системно-организованного знания, элементы которого отчётливо выделены, а их взаимосвязи осознаны, многовариантности и гибкости, то есть, умения видеть несколько способов решения данной задачи и находить решение при изменении отдельных элементов её условия.

НИРС на кафедре физики включает участие в олимпиаде, студенческой научной конференции, в рамках которой проводится конкурс на лучшую работу, и участие в разработке проектов, имеющих практический выход в учебный процесс. Для студентов организуются специальные занятия (семинары) по решению нестандартных задач. Решение нестандартных задач, содержание которых зачастую охватывает несколько разделов дисциплины, требует от студентов ясного понимания основных законов, владения математическими методами, подлинно творческого умения применять их для объяснения физических явлений. Оно побуждает студентов к более глубокому изучению фундаментальной дисциплины, развивает

изобретательность, расширяет арсенал средств, которые необходимы для продуктивного решения инженерных задач.

Другое направление связано с творческим поиском и переработкой информации при подготовке рефератов и докладов на конференцию. Нами разработано положение, в котором изложены требования к содержанию и оформлению работ, критерии их оценки в условиях конкурса. Ежегодно составляется примерный список тем, охватывающий как фундаментальные вопросы научной картины мира (современные космологические модели, общая теория пространства и синергетика), так и вопросы технического применения физических открытий во времени, отраслях энергетики и телекоммуникаций. В частности, наших студентов привлекают следующие темы: физические основы оптико-волоконной связи, применение лазеров, шумовая температура и радиотехнические методы измерения температур, радиоастрономические методы исследования космических объектов, проблемы и перспективы атомной энергетики, возобновляемые источники энергии. Иногда тему предлагают сами студенты, обнаружив заинтересовавшие их сведения в ресурсах глобальной сети. Как правило, такие темы касаются новейших перспективных научно-технических разработок, к примеру – нанотехнологий. При этом у студентов развивается умение составить план выступления, четко и ясно изложить основное содержание, отстаивать свою точку зрения при обсуждении проблемы. Интерес и стремление быть в курсе наиболее значимых новейших достижений в научно-технической сфере отличает творчески активных студентов - будущих инженеров и выступает одним из факторов, способствующих развитию их профессионального мышления.

Таким образом, методическая работа кафедры, основанная на научном подходе к обучению физики во втузе, позволила разработать содержательную и процессуальную стороны СРС, представляющую часть единой информационно-методической системы, обеспечивающей готовность преподавателей деятельности в условиях университета.

Заключение

Мы коснулись лишь некоторых вопросов совершенствования модели подготовки будущих бакалавров, что не может полностью

решить проблему кредитной технологии в вузовском обучении. Исследования в этом направлении будут продолжены, в частности, в дальнейшем мы считаем целесообразным перейти к разработке комплексных индивидуальных задач на основе междисциплинарных связей. Например, сложные физико-математические задачи, позволяющие студентам усваивать материал по двум предметам одновременно. Такие задания экономят время студента и позволяют получить практические знания.

Как видно из вышеизложенного, при обновлении модели обучения физике речь идёт

о совершенствовании двух основных компонентов этой модели – содержания и процесса в их единстве и взаимодействии с учётом инновационных процессов в современных вузах. Современные научно-педагогические знания позволяют ставить и решать такие задачи. Что же касается педагогической инновации как процесса творческой деятельности, то она ведёт к повышению профессионального мастерства педагогов и, как следствие, к повышению качества подготовки студентов.

Литература

1. Aldous H. Education and business: partners in building human capital, in Human Capital and Corporate Regulation // Institute of Chartered Accountants. A. Carey, N. Sleigh-Johnson. London: Education Press, 2000.
2. Нечаев В.Д., Вербицкий, А.А. Через контекст – к модулям: опыт МГГУ им. М.А. Шолохова / В.Д. Нечаев, А.А. Вербицкий // Высшее образование в России. – 2010. – №6. – С. 3-11.
3. Мажитова Л.Х., Наурызбаева Г.К. К проблеме формирования профессионально-ориентированных компетенций студентов бакалавриата технического вуза // Материалы III Республиканской научно-практической конференции. – Алматы, 2010. – С. 74-76.
4. Байденко В.И. Компетентностный подход к проектированию государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (методологические и методические вопросы): Методическое пос. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2005. – 114 с.
5. Хуторской, А.В. Технология проектирования ключевых и предметных компетенций [Электронный ресурс] – Интернет-журнал «Эйдос» Режим доступа: <http://eidos/journal/2005/1212.html>
6. Болонский процесс: поиск общности европейских систем высшего образования (проект TUNING) / Под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. В.И. Байденко. – М., 2006. – 211 с.
7. Россихин А.В., Измагурова В.Л. Личность в измененных состояниях сознания: в психоанализе и психотерапии. – М.: Смысл, 2004. – 544 с.
8. Вербицкий А.А. Активное обучение в высшей школе: контекстный подход: Метод. пособие. – Высш. шк. – 1991. – С. 207.
9. Вербицкий А. А. Контекстное обучение в компетентностном подходе // Высшее образование в России. – 2006. – №11. – С. 39-46.
10. Педагогический словарь: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / [В.И. Загвязинский, А.Ф. Закирова, Т.А. Строкова и др.]; под ред. В.И. Загвязинского, А.Ф. Закировой. М.: Изд. центр «Академия», 2008. 352 с.
11. Хитрюк В.В. Профессиональное образование. – 2014. – №9. – С. 127-130.
12. Густяхина В.П. Контекстный подход в профессиональной подготовке будущих учителей // Современные проблемы науки и образования. – М., 2009. – №2. – С. 57-60.
13. Вербицкий А.А., Калашников В.Г. Контекст как психологическая категория // Вопросы психологии. – 2011. № 6. – С. 3-15, 9.
14. Вербицкий А.А., Калашников В.Г. Понятие «контекст» в категориальном строении психологической науки // Педагогика и психология образования. – 2015. № 4. – С. 90-99.
15. Лаврентьев Г.В., Лаврентьева Н.Б., Неудахина Н.А. Инновационные обучающие технологии в профессиональной подготовке специалистов: учебное пособие. Ч. 2. – Барнаул: Изд-во АГУ, 2009. – С.18-28.
16. Мажитова Л.Х., Наурызбаева Г.К. Информационно-деятельностное обучение как основа организации самостоятельной работы студентов // Вестник АУЭС. – 2014. – №3. – С.14-22.
17. Martin L. Developing entrepreneurial competencies-an action-based approach and classification in education. Licentiate Thesis, ISSN: 1654-9732. Report number L2013:070. © Martin Lackéus, 2013.
18. Вербицкий А. А. Категория “контекст” в психологии и педагогике: монография / А. А. Вербицкий, В. Г. Калашников. – М.: Логос, 2010. – 300 с.
19. Вербицкий А.А. Теория и технологии контекстного образования. – М.: Московский педагогический государственный университет, 2017. – 268 с.

References

1. H. Aldous Education and business: partners in building human capital, in Human Capital and Corporate Regulation, (Institute of Chartered Accountants / A. Carey, N. Sleigh-Johnson. London: Education Press, 2000).
- 1 V.D. Nechaev, A.A. Verbitsky, Cherez kontekst – k modulyam: opyt MGGU im. M.A. Sholokhova. Higher education in Russia. [Through context - to modules: the experience of the Moscow state University. M. A. Sholokhova / V. D. Nechaev, A. A. Verbitsky // Higher education in Russia] 6, 3-11 pp. (2010) (in Russian)
- 2 Mazhitova L.H., Nauryzbayeva G.K. (2010) On the problem of the formation of professionally-oriented competencies of undergraduate students of a technical college // Materials of the III Republican Scientific Practical Conference. pp. 74-76.
- 3 Baidenko, V.I. (2005) Kompetentnostnyy podkhod k proyektirovaniyu gosudarstvennykh obrazovatelnykh standartov vysshego professional'nogo obrazovaniya (metodologicheskiye i metodicheskiye voprosy): Methodicheskoe posobie / V.I. Baidenko – M.: Issledovatelskii centre problem kachestva podgotovki specialistov, M.: Issledovatelskii centre problem kachestva podgotovki specialistov. [Competence-based approach to the design of state educational standards of higher professional education (methodological and methodological issues): Methodical manual / V. I. Baydenko-M.: Research center for quality problems of training.], 114 p. (in Russian)
- 4 Khutorskoy, A.V. (2005) Tekhnologiya proyektirovaniya klyuchevykh i predmetnykh kompetentsiy. Retrieved from: Eidos Online Journal Access mode: <http://eidos/journal/2005/1212.html> [Technology of design of key and subject competences [Electronic resource] - Internet journal “Eidos” access Mode: <http://eidos/journal/2005/1212.html> (in Russian).
- 5 Bologna process: the search for a common European higher education systems (project TUNING) (2006). Pod nauch. red. prof. V.I. Baidenko. M., 211 p. [Bologna process: search for commonality of European higher education systems (TUNING project) / edited by dr. ped. s., prof. V.I. Baidenko] (in Russian)
- 6 Rossikhin, A.V., Izmagurova V.L. (2004) Lichnost v izmenennykh sostoyaniyakh soznaniya: v psikhoanalize i psikhoterapii. M.: Smysl, [Personality in altered States of consciousness: in psychoanalysis and psychotherapy. M.: Meaning], 554 p.
- 7 Verbitsky, A.A. (1991) Aktivnoye obuchenije v vysshayey shkole: kontekstnyy podkhod. Method. guide. – Vyschaya shkola. p. 207 [Active learning in higher education: a contextual approach // Methodical manual. – Higher school.] (in Russian)
- 8 Verbitsky, A. A. (2006) Kontekstnoye obuchenije v kompetentnostnom podkhode. Vysshaya shkola v Rossii, №11, 39-46 pp. [Contextual learning in the competence approach // Higher education in Russia. Higher education in Russia,] (in Russian).
- 9 Pedagogicheskiy slovar: uchebnoe posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenii (2008) pod red. V.I. Zagvyazinsky, A.F. Zakirova, T.A. Strokova et al. M.: Publishing Center “Academiya”, [Pedagogical dictionary: textbook for students of higher educational institutions/ [V. I. Zagvyazinsky, A. F. Zakirova, T. A. Strokova, etc.]; edited by V. I. Zagvyazinsky, A. F. Zakirova. Moscow: Ed. center “Academy»,] 352 p. (in Russian).
- 10 Khitryuk, V.V. (2014) Professionalnoye obrazovaniye, [Professional education] № 9, 127-130 pp. (in Russian).
- 11 Gustyakhina, V.P. (2009) Kontekstnyy podkhod v professional'noy podgotovke budushchikh uchiteley. Modern problems of science and education. M., [Contextual approach in professional training of future teachers // Modern problems of science and education. M.] № 2, 57-60 pp. (in Russian).
- 12 Verbitsky, A.A., Kalashnikov, V.G. (2011) Kontekst kak psikhologicheskaya kategoriya. Psychology Issues. [Context as a psychological category // Questions of psychology.] № 6, p. 9 (in Russian).
- 13 Verbitsky, A.A., Kalashnikov V.G. (2015) Pomyatiye «kontekst» v kategorialnom stroye psikhologicheskoy nauki. Pedagogy and Psychology of Education, [The concept of “context” in the categorical structure of psychological science // Pedagogy and psychology of education] №4, 90–99 pp. (in Russian).
- 14 Lavrentiev G.V., Lavrentieva, N.B., Neudakhina, N.A. (2009) Innovatsionnyye obuchayushchiye tekhnologii v professionalnoy podgotovke spetsialistov: an educational manual. Part 2. Barnaul: Publishing house of ASU, 18-28 pp. (in Russian).
- 15 Mazhitova L.H., Nauryzbayeva G.K. (2014) Information-activity training as a basis for organizing independent work of students // Vestnik AUPET. – Almaty, – no.3. pp.14-22.
- 16 Martin L. (2013) Developing entrepreneurial competencies-an action-based approach and classification in education. Licentiate Thesis, ISSN: 1654-9732. Report number L2013:070. © Martin Lackéus.
- 17 Verbitsky A. A. (2010) Kategoriya “kontekst” v psikhologii i pedagogike: monograph. M.: Logos, 300 p. (in Russian).
- 18 Verbitsky A.A. (2017) Teoriya i tekhnologii kontekstnogo obrazovaniya. – M. Moskovskii pedagogicheskii gosudarstvennyi universitet [Theory and technologies of contextual education. - Moscow: Moscow pedagogical state University] 268 p. (in Russian).

МАЗМУНЫ – CONTENTS – СОДЕРЖАНИЕ

1-бөлім

Теориялық физика. Ядро және элементар бөлшектер физикасы.
Астрофизика

Section 1

Theoretical Physics. Nuclear and Elementary Particle Physics.
Astrophysics

Раздел 1

Теоретическая физика. Физика ядра и элементарных частиц.
Астрофизика

Kalambay M.T., Naurzbayeva A.Zh., Otebay A.B., Abdinassilim A.T., Kuvatova D., Assilkhan A.D., Panamarev T., Shukirgaliyev B.T., Berczik P.P.

Mock observations of simulated star cluster on solar orbit..... 4

Nazar A.B., Manapbayeva A.B., Alimgazinova N.SH., Kyzgarina M.T., Demessinova A.M.

Identification of young star objects near dust bubble N10 13

2-бөлім

Конденсирленген құй физикасы және материалтану проблемалары. Наноғылым

Section 2

Condensed Matter Physics and Materials Science Problems.
Nanoscience

Раздел 2

Физика конденсированного состояния и проблемы материаловедения. Нанонаука

Жумадилов Б.Е., Кенжегулев А.К., Медьянова Б.С., Оспанали А.Т., Суюндыкова Г.С., Партизан Г., Ерланулы Е., Габдуллин М.Т.

Синтез углеродных нановолокон и алмазоподобных углеродов методом кислородно-ацетиленовой горелки..... 22

Толубаева Д.Б., Гриценко Л.В.

Зависимость электрохимических свойств биосенсоров от морфологии слоёв оксида цинка 29

Suiinzhanova U.P., Aldiyarov A.U., Beisenov K.I.

Study of glassy states of cryocondensates of organic molecules 38

3-бөлім

Жылу физикасы және теориялық жылу техникасы

Section 3

Thermophysics and Theoretical Heat Engineering

Раздел 3

Теплофизика и теоретическая теплотехника

Safarik P., Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bolegenova S.A., Ospanova Sh.S., Nugymanova A.O.

Study of the aerodynamics of the flow of the combustion chamber of a power plant with various supply of solid fuel..49

4-бөлім

Жоғары мектепте физика пәнін оқыту әдістемесі

Section 4

Methods of teaching high school physics

Раздел 4

Методика преподавания физики в высшей школе

Мукушев Б.А.

Энергетическая картина гравитационного поля Солнечной системы 59

Похолков Ю.П., Муравлев И.О., Червач М.Ю.

Методика и математическая модель оценки компетенций, приобретаемых студентами в процессе изучения дисциплины «Физико-химия диэлектрических материалов»..... 67

Наурызбаева Г.К., Габдуллина Г.Л.

Организация СРС по курсу физики в условиях технического университета. 81