

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

№2 (77)

Алматы
«Қазақ университеті»
2021



KazNU Science · КазҰУ Фылымы · Наука КазНУ

ISSN 1563-0315; eISSN 2663-2276

ХАБАРШЫ

ФИЗИКА СЕРИЯСЫ №2 (77) маусым



04.05.2017 ж. Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникация министрлігінде тіркелген

Күзелік № 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: akmaral@physics.kz

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

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

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

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

Аскарова Э.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)

Ишицука 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 қолданбалы зерттеулер бойынша бірегей фылыми және шолу макалаларды жарияладтын фылыми басылым.



Crossref
Content
Registration

DOI
DIGITAL
OBJECT
IDENTIFIER

Національний центр
государственной
научно-технической
экспертизы

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
Science Index

Academic
Resource
Index
ResearchBib

DRJI
Directory of
Research Journal
Indexing



Жоба менеджери

Гульмира Шаккозова

Телефон: +7 701 724 2911

E-mail: Gulmira.Shakkozova@kaznu.kz

Редакторлары:

Гульмира Бекбердиева

Аигила Хасанқызы

Компьютерде беттеген

Айгүл Алдашева

ИБ № 14625

Пішімі 60x84 1/8. Қөлемі 5,8 б.т. Тапсырыс № 6086.
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Қазақ университеті» баспа үйі.

050040, Алматы қаласы, әл-Фараби даңғылы, 71.
«Қазақ университеті» баспа үйінің баспаханасында
басылды.

© Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, 2021

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**

FTAMP 29.05.45; 29.17.19;
41.29.00; 41.29.17; 41.29.21

<https://doi.org/10.26577/10.26577/RCPh.2021.v77.i2.01>

Ш.Р. Мырзакұл^{1,2*} , М.Ж. Есентай¹ , Г.А. Сотанова¹ , Т.Р. Мырзакұл³ 

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ.

²«Ratbay Myrzakulov Eurasian International Centre for Theoretical Physics» ЖШС, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ.

³Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: srmyrzakul@gmail.com

ХОРАВА-ЛИФШИЦТІҢ $f(R)$ ГРАВИТАЦИЯСЫНДАҒЫ ТҮТҚЫР СҮЙЫҚТЫҚТЫҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫ

Әлемнің үдемелі кеңеюін сипаттайтын жаңартудың екі жолы бар: не геометрияны немесе материяны жаңарту қажет. Осы үақытқа дейін жаңартудың көптеген моделдері ұсынылған, соның біреуі, кеңінен таралған – $f(R)$ гравитациясы болып табылады. $f(R)$ гравитациясы белгілі Эйнштейн-Гильберт әсеріндегі қисықтық тензоры R -дің орнына, оның жалпыланған функциясын $f(R)$ -ді қою, осы кезде геометрия өзгереді.

Жалпы салыстырмалылық теориясы мен кванттық физиканың бірігуі қазіргі заманың мәңгілік мәселелерінің біріне айналды. 1942 жылы Лифшиц гравитация мен кванттық физиканың біріктірін жоғарғы энергияларда анизотропты масштабтауға негізделген моделін ұсынды, ал 2009 жылы оның үнитарлық, гравитациясы ренормалданған нұсқасын жапон ғалымы Питер Хорава ұсынды. Соңғы жылдардағы зерттеулерде – Хорава-Лифшиц гравитациясы деген атау кеңінен таралды. 2010 жылы Масуд Чайчян, Шиничи Ноджирі, Сергей Д. Одінтсов, Маркку Оксанен және Анка Туряну бірлесіп осы теорияның жалпыланған түрін $f(R)$ – гравитацияны ұсынды.

Бұл жұмыста Хорав-Лифшицтің жалпыланған гравитациясы осындай гравитацияға негізделген кеңістік-үақыттағы біртекті емес тұтқыр сүйықтық үшін зерттелетін болады. Тұрақты тұтқырлық, кезінде үақыттың ұлғаюымен жарық пен бариондық заттың тығыздығы мен қысымы төмендейді. Егер қараңғы энергия күйін, яғни $\omega = -1$ болғандағы жағдайды қарастыратын болсақ, онда тығыздық пен қысым шексіздікке үмтүлады. Соңықтан, егер біз тұтқырлықты тұрақты деп санақақ, вакуумдағы жағдай үшін Әлем шексіз кеңейеді.

Тұйін сөздер: қараңғы энергия, Хорава-Лифшицтің $f(R)$ гравитациясы, тұтқыр сүйықтық.

Sh.R. Myrzakul^{1,2 *}, M.Zh. Esentai¹, GA. Sotanova¹, T.R. Myrzakul³

¹L.N. Gumilev Eurasian National University, Kazakhstan, Nur-Sultan

²"Eurasian International Center for Theoretical Physics Ratbay Myrzakulov" LTD, Kazakhstan, Nur-Sultan

³Kazakh National Women's Pedagogical University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: srmyrzakul@gmail.com

Evolution of a viscous fluid in Horava-Lifshitz $f(R)$ gravity

There are two modification methods that describe the accelerated expansion of the Universe: it is necessary either to modify the geometry or matter. Until now, many modified models have been proposed, one of which is common $f(R)$ gravity. In $f(R)$ gravity, in the well-known Einstein-Hilbert action, we replace the curvature tensor R with its generalized function $f(R)$, and the geometry changes.

The unification of general relativity and quantum physics has become one of the most important issues of our time. In 1942, Lifshitz proposed a model based on high-energy anisotropic scaling that combines gravity and quantum physics, and in 2009 the Japanese scientist Peter Khorava proposed its unitary, renormalized version of gravity. In the studies of recent years, the name has spread – the gravity of Horava-Lifshits. In 2010, Masud Chaichyan, Shinichi Nojiri, Sergei D. Odintsov, Markku Oksanen, and Anka Tureanu jointly proposed a generalized form of this theory – $f(R)$ gravity.

In this work, the generalized gravity of Horava-Lifshitz will be studied for an inhomogeneous viscous fluid in space-time, based on this kind of gravity. At constant viscosity, with increasing time, the density and pressure of light and baryonic matter decrease. If we consider the state of dark energy, that is, the case when $\omega = -1$, then the density and pressure tend to infinity. Therefore, if we consider the viscosity constant, for the case in a vacuum, the universe will expand infinitely.

Key words: dark energy, Horava-Lifshitz gravity, viscous fluid.

Ш.Р. Мырзакұл^{1,2*}, М.Ж. Есентай¹, Г.А. Сотанова¹, Т.Р. Мырзакұл³

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, г. Нур-Султан
²ТОО «Евразийский международный центр теоретической физики Ратбай Мырзакулов»,
Казахстан, г. Нур-Султан

³Казахский национальный женский педагогический университет, Казахстан, г. Алматы
*e-mail: srmyrzakul@gmail.com

Эволюция вязкой жидкости в Хоравы-Лифшица $f(R)$ гравитации

Существует два способа модификации, описывающих ускоренное расширение Вселенной: необходимо либо модифицировать геометрию, либо материю. До сегодняшнего дня было предложено множество модифицированных моделей, одна из которых – распространенная $f(R)$ гравитация. В $f(R)$ гравитации в известном действии Эйнштейна-Гильберта заменяется тензор кривизны R на его обобщенную функцию $f(R)$, при этом изменяется геометрия.

Объединение общей теории относительности и квантовой физики стало одним из важнейших вопросов современности. В 1942 году Лифшицом была предложена модель, основанная на анизотропном масштабировании при высоких энергиях, которая сочетает в себе гравитацию и квантовую физику, а в 2009 году японским ученым Питером Хорава была предложена ее унитарная, перенормированная версия гравитации. В исследованиях последних лет распространилось название – гравитация Хорава-Лифшица. В 2010 году Масуд Чайчян, Шиничи Нодзири, Сергей Д. Одинцов, Маркку Оксанен и Анка Турьяну совместно предложили обобщенный вид этой теории – $f(R)$ гравитацию.

В этой работе будет изучаться обобщенная гравитация Хорава-Лифшица для неоднородной вязкой жидкости в пространстве-времени, основанной на этом виде гравитации. При постоянной вязкости, с увеличением времени плотность и давление света и барионного вещества уменьшаются. Если рассматривать состояние темной энергии, то есть случай, когда $\omega = -1$, то плотность и давление стремятся к бесконечности. Следовательно, если мы считаем вязкость постоянной, для случая в вакууме, Вселенная будет бесконечно расширяться.

Ключевые слова: темная энергия, $f(R)$ гравитации Хорава-Лифшица, вязкая жидкость.

Kіріспе

Әлемнің үдемелі кеңеюі ашылғаннан бері қарандырылған энергия мәселесі деп аталатын көптеген модельдер [1] – [23] ұсынылды. Олардың ең қаралайымы – Эйнштейнның жалпы салыстырмалылық теориясы (ЖСТ) шенберіндегі, мәні кішкентай және ондағы космологиялық тұрақты енгізу арқылы жүзеге асырылатын модель (ЛСДМ модельі). Бұл жағдайда үдемелі кеңеюндің күй параметрі $\omega = -1$, қарандырылған энергия сұйықтығының теріс қысымының әсерін көрсетеді. Бұғынгі күні қарандырылған энергияның табигаты «Мыңжылдықтың құпиясына» айналды және оның физикасы фундаменталды болғандықтан, ең өршіл және таңқаларлық зерттеу аймағы болып табылады. Бір жағынан қарандырылған сұйықтықтың күй параметрі минус бірге ете жақын болғандықтан, Космологиялық тұрақты тәрізді көрініспен сипаттауга болғанымен, космологиялық тұрақтының мәні кішкентай болғандықтан, бұл жағдай бірнеше белгілі қайшылықтарға әкеледі және космологиялық тұрақтысы бар ЖСТ түпкілікті гравитациялық теория емес, деғенмен ол қазіргі таңда кеңінен таралған және бақылау нәтижелерін ең жуық сипаттайтын тео-

риялардың бірі. Сонымен қатар, соңғы космологиялық бақылау мәліметтеріне сәйкес, қараңғы энергияның күй параметрі $\omega = -0,972^{+0,061}_{-0,060}$ аралықта шектелген, сондықтан күйді сипаттайтын қолайлыш деңгээде қанағаттаныратын қараңғы сұйықтықтың әр түрлі формаларына (фантом, квинтессенция, біртекті емес сұйықтықтар және т.б.) жол беріледі [21].

Фридман-Робертсон-Уокер (ФРУ) әлеміндегі идеал емес сұйықтықтарды зерттеудің бірнеше артықшылығы бар [22]. Біріншіден, көптеген макроскопиялық физикалық жүйелер, мысалы, Галамның ауқымды құрылымындағы материя мен жарықты идеал сұйықтықпен (күй деңгээде $p = \omega\rho$, ω – тұрақты) жуықтауға болатындығына қарамастан, біз шығу тегі белгісіз қараңғы энергияның басқа композицияларын жоққа шығара алмаймыз. Содан кейін, соңғы жылдарды гравитацияның жаңартылған теорияларына деңгээнде қызығушылық артты. Бұл теориялар Эйнштейннің теориясын өзгертуді және жалпы Эйнштейн-Гильберт әрекетіндегі қисықтық инварианттың әртүрлі жалпыланған құраушылармен (Риман тензоры, Вейл тензоры, Риччи тензоры және басқалары) ауыстырады немесе толықтырады.

Гравитацияның жаңартылған теориялардың сұйықтық тәрізді түрге сәйкес сипаттамага ие екендігін ескерген жөн, ал біртекті емес тұтқыр сұйықтықтарды зерттеу – мұндай альтернативті теориялардың кейбір жалпы белгілерін түсінудің қарапайым тәсілдерінің бірі [23].

$f(R)$ гравитациясы үшін жалпылаған Хорава-Лифшиц теориясын [24]-ші жұмыстың авторы ұсынып, оны [24-28]-ші жұмыстарында әр түрлі тұрғыдан қолданып, зерттеулер жүргізген. Ол модельдің бір шегі Хорава-Лифшицтің жалпыланған гравитациясына әкеледі. Осылайда модельдер үшін ФРУ қозғалыс теңдеулерін алдын-ала зерттеу бай космологиялық құрылымдаға ие және ерте инфляция мен қарандырылған энергия дәуірлерін үйлестірудің табиғи мүмкіндігін көрсетеді. Бұл жұмыста, біз жазық ФРУ уақыт-кеңістігінде күйі әртүрлі және тұтқырлығы тұрақты сұйықтықтарды Хорава-Лифшиц $f(R)$ гравитациясы аясында зерттейміз.

$$S = \int d^4x \left[a^3 f(R) - a^3 \sigma \left[R - \left(A \frac{\dot{a}(t)^2}{a(t)^2} + B \frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} \right) \right] \right], \quad (3)$$

$$\text{мұндағы } \sigma = \frac{df(R)}{dR} = f', \quad A = 3 - 9\lambda + 12\mu,$$

$B = 6\mu$ кез-келген он тұрақтылар. Әрі қарай, ұқыпты жазу үшін функцияның аргументтерге тәуелділігін жоққа шығарамыз. Нұкте уақыт бойынша дифференциялдау, ал штрих R бойынша дифференциалдау деп белгілейік. Осылайша, гравитацияның Лагранжы келесі түрге ие болады

$$L = a^3 f - a^3 f' R + (A - 2B) a \dot{a}^2 f' - B a^2 \dot{a} f'' \dot{R}. \quad (4)$$

Эйлер-Лагранж теңдеуін қолдана отырып, қозғалыс теңдеулерін анықтаймыз

$$R = B \dot{H} + (A + B) H^2, \quad (5)$$

$$p = -(2 \dot{H} + 3H^2), \quad (6)$$

нөлдік энергия шарттын қолдана отырып, біз екінші Фридман теңдеуін табамыз

$$\rho = 3H^2. \quad (7)$$

Модельдің негізі

Ең кіші әсер шарты бойынша қарастырып отырып модельдің әсері

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} (f(R) + L_m), \quad (1)$$

мұндағы $g = g_{\mu\nu}$ метрикалық тензорының анықтауышы және $f(R)$ функциясы қисықтық скаляры, R Риччи скаляры, L_m материя Лагранжианы болып табылады.

ФРУ метрикасын қолданамыз

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 [dx^2 + dy^2 + dz^2], \quad (2)$$

мұндағы $a(t)$ масштабты факторды білдіреді. ФРУ метрикасы үшін (1) әсерді мына түрде жазамыз

Біздің модель үшін қысым былай анықталады

$$p = \frac{-B f'' \dot{R}^2 - B f' \ddot{R} + 3 f' R - 3 F}{(A - 2B) f'}, \quad (8)$$

және энергия тығыздығы

$$\rho = \frac{3(BHf' \dot{R} - f' R + f)}{(A - 2B) f'}. \quad (9)$$

ФРУ теңдеулеріндегі p және ρ – қысым мен Әлемнің энергия тығыздығы мына түрдегі энергияның сақталу заңын қанағаттандыру керек

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0. \quad (10)$$

Бұл жұмыста біз біртекті емес тұтқыр сұйықтық үшін күй теңдеуінің жалпыланған түрін қарастырамыз [29]

$$p = \omega(\rho)\rho - J(a(t), H, \dot{H}), \quad (11)$$

мұндағы $\omega(\rho)$ – күй параметрі, энергия тығыздығына тәуелді болуы мүмкін, ал $\mathbf{J}(\mathbf{a}(t), \mathbf{H}, \dot{\mathbf{H}}\dots)$ – көлемді тұтқырлық, масштаб факторына, Хаббл параметріне және оның туындыларына тәуелді жалпы функция болып табылады. Термодина-

микалық себептер бойынша, қайтымсыз процесте энтропияның өзгеруі оң таңбалы болу үшін сұйықтықтың тұтқырлығы да оң болуы қажет. Сұйықтың $T_{\mu\nu}$ энергия-импульс тензоры мына түрге ие

$$T_{\mu\nu} = \rho u_\mu u_\nu + [\omega(\rho)\rho + J(\rho, a(t), H, \dot{H}\dots)](g_{\mu\nu} + u_\mu u_\nu), \quad (12)$$

мұндағы $u_\mu = (1, 0, 0, 0)$ төрт өлшемді жылдамдық векторы. Сұйықтықтың энергия сақталу заңы (10) ақыр соңында мынандай түрге келеді

$$\dot{\rho} + 3H\rho(1 + \omega(\rho)) = 3HJ(\rho, a(t), H, \dot{H}\dots). \quad (13)$$

Келесі бөлімде зерттеулер біртекті емес тұтқыр сұйықтық күйінің тендеуінің қарапайым шешімімен жүзеге асырылады

Космологиялық шешім

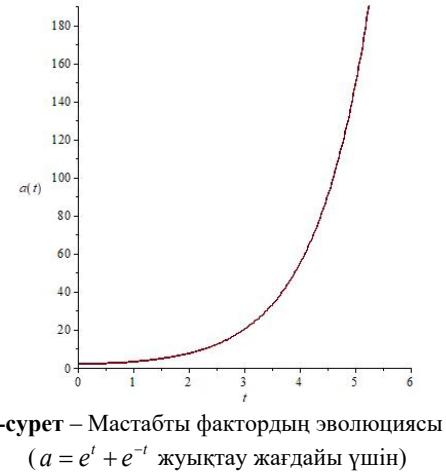
Тұтқырлығы мен күй параметрі тұрақты жағдайды қарастырайық. Онда Хаббл параметрі

$$H = \frac{\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}}{2(1+\omega)} \left(e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} - 1 \right) \left(e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} + 1 \right)^{-1}, \quad (14)$$

және масштабты фактор

$$a = a_0 \left(e^{\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} + e^{-\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} \right)^{\frac{1}{1+\omega}}$$

экспоненциалды дамиды. Төмендегі суретте тұрақтыларды 1-ге тең деп алып, масштабты фактордың динамикасының графигін түрғыздық.



Энергияның сақталу заңынан (10) энергия мен қысымның тығыздығының балансы табамыз

$$\rho(t) = \frac{\xi}{1+\omega} \left(\frac{e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} - 1}{e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} + 1} \right)^2, \quad (15)$$

$$p(t) = -\frac{\left(3e^{4\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} + 8(1+\omega)e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} - 6e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} + 3 \right) \xi}{3(1+\omega) \left(e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi(1+\omega)}(t-t_0)} + 1 \right)^2}. \quad (16)$$

Енді әртүрлі күйлерді қарастырайық. Бариондық материя үшін $\omega = 0$, яғни

$$\rho(t) = \xi \left(\frac{e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi}(t-t_0)} - 1}{e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi}(t-t_0)} + 1} \right)^2, \quad (17)$$

$$p(t) = -\frac{\left(3e^{4\sqrt{\frac{3}{4}\xi}(t-t_0)} + 2e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi}(t-t_0)} + 3 \right) \xi}{3 \left(e^{2\sqrt{\frac{3}{4}\xi}(t-t_0)} + 1 \right)^2}, \quad (18)$$

ал жарық болғанда $\omega = 1/3$, яғни

$$\rho(t) = \frac{3\xi}{4} \left(\frac{e^{2\sqrt{\xi}(t-t_0)} - 1}{e^{2\sqrt{\xi}(t-t_0)} + 1} \right)^2, \quad (19)$$

$$p(t) = -\frac{\left(3e^{4\sqrt{\xi}(t-t_0)} + 8e^{2\sqrt{\xi}(t-t_0)} \frac{4}{3} - 6e^{2\sqrt{\xi}(t-t_0)} + 3 \right) \xi}{4 \left(e^{2\sqrt{\xi}(t-t_0)} + 1 \right)^2}. \quad (20)$$

Корытынды

Кортындылай келе, 1-суретте көрініп тұргандай, тұрақтылардың белгілі мәндері үшін масштабты фактордың динамикасы үдемелі ұлғаюда, яғни қарастырылып отырған модель бақылау мәлеметіне толықтай сәйкес келеді. Тұрақты тұтқырлық үшін уақыт өскен сайын жарық пен бариондық материя тығыздығы мен қысымы азаяды. Яғни заттар Әлем кеңейген сайын бір-бірінен алшақтайды. Бұл де-Ситтер шешімі нәтижелеріне ұқсас келеді. Егер караңғы энергия күйін қарастыратын болсақ, яғни $\omega = -1$, онда тығыздық пен қысым шексіздікке ұмтылады. Сондықтан егер тұтқырлықты тұрақты деп қарастырсақ, вакуум жағдайы үшін әлем шексіз кеңеңде береді.

Алғыстар. Берілген зерттеулер КР БФМ гранттық қаржыландырылған AP08052197 «Тұтқыр сұйықтықпен сипатталатын Әлемнің эволюциясы барысында барионды материяның қалыптасуы» жоба шеңберінде жасалған.

Әдебиеттер

- 1 Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P., Clocchiatti A., Diercks A., Garnavich P.M. Gilliland R.L., Hogan, C.J., Jha, S. and Kirshner, R.P., et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant //Astron. J. – 1998. – Vol.116. – P.1009-1038.
- 2 Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., Knop, R.A., Nugent, P., Castro, P.G., Deustua, S., Fabbro, S., Goobar, A. and Groom, D.E., et al. Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae // Astrophys. J. – 1999. – Vol.517. – P.565-586.
- 3 Spergel, D.N., Verde, L., Peiris, H.V., Komatsu, E., Nolta, M.R., Bennett, C.L., Halpern, M., Hinshaw, G., Jarosik, N. and Kogut, A., et al. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters //Astrophys. J. Suppl. – 2003. – Vol.148. – P.175-194.
- 4 Peiris, H.V., Komatsu, E., Verde, L., Spergel, D.N., Bennett, C.L., Halpern, M., Hinshaw, G., Jarosik, N., Kogut, A., Limon, M. and Meyer, S.S., et al. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* Observations: Implications For Inflation //Astrophys. J. Suppl. – 2003. – Vol.148. – P.213-231.
- 5 Astier, P., Guy, J., Regnault, N., Pain, R., Aubourg, E., Balam, D., Basa, S., Carlberg, R.G., Fabbro, S. and Fouchez, D., et al. The Supernova Legacy Survey: measurement of Ω_M , Ω_Λ and w from the first year data set //Astron. Astrophys. – 2006. – Vol.447. – P.31-48.
- 6 Riess, A.G., Strolger, L.-G., Casertano, S., Ferguson, H.C., Mobasher, B., Gold, B., Challis, P.J., Filippenko, A.V., Jha, S., Li, W. and Tonry, J., et al. New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at $z > 1$: Narrowing Constraints on the Early Behavior of Dark Energy //Astrophys. J. – 2007. – Vol.659. – P.98-121.
- 7 Spergel, D.N., Bean, R., Doré, O., Nolta, M.R., Bennett, C.L., Dunkley, J., Hinshaw, G., Jarosik, N., Komatsu, E. and Page, L., et al. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology //Astrophys. J. Suppl. – 2007. – Vol.170. – P.377-408.
- 8 Myrzakul S.R., Yerzhanov K., Kenzhalin D. Zh., Myrzakulov K.R. Teleparallel dark energy model with fermionic field for bianchi type I spacetime //News of the national academy of sciences of the RK. Series physico-mathematical. – 2019. – Vol.5 (327). – P.11-18.
- 9 Myrzakul S.R., Myrzakulov Y.M., Arzimbetova M. Inflation in $F(R,T)$ gravitation with f-essence. //News of the national academy of sciences of the RK. Series physico-mathematical. – 2020. – Vol. 5 (333). – P.106-112.
- 10 Saridakis E. N., Myrzakulov K.R. and Yerzhanov K.K. Cosmological applications of $F(R,T)$ gravity with dynamical curvature and torsion //Physical Review D. – 2020. – Vol.102, N 2. Art No 023525. – 16 p.

- 11 Myrzakulov R. and Sebastiani L. $f(\phi)R$ -models for inflation //International Journal of Modern Physics D. – 2016. – Vol. 25, N4. – Art.No 1650041. – 11p.
- 12 Myrzakul S. R. et al. Inflation model with viscous fluid //Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol.1730. – Art.No 012136.
- 13 Pacif S.K.J. and Myrzakulov R. Reconstruction of cosmic history from a simple parametrization of H // International Journal of Geometric Methods in Modern Physics. – 2017. – Vol. 14, N7. – Art.No 1750111. – 27 p.
- 14 Myrzakulov R. and Sebastiani L. Warm inflation in Horndeski gravity //Gen. Relativ. Gravit. – 2017. – Vol.49, N 7. Art.No 90. -16 p.
- 15 Myrzakulov R. and Sebastiani L. Reconstruction of k-essence inflation in Horndeski gravity //European physical journal plus. – 2017. – Vol.132, N 10. – Art.No 5433 – 11p.
- 16 Myrzakulov R. and Sebastiani L. Reconstruction of inflation from scalar field non-minimally coupled with the Gauss-Bonnet term //European physical journal plus. – 2017. – Vol.132, N 12. – Art.No 514 – 9p.
- 17 Saridakis E. N., Myrzakulov K.R. and Yerzhanov K.K. Cosmological applications of $F(R,T)$ gravity with dynamical curvature and torsion //Physical Review D. – 2020. – Vol.102, N 2. Art No 023525. – 16 p.
- 18 Myrzakul S. R. et al., gravity with scalar field viscous fluid //Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol.1730. – Art.No 012021.
- 19 Pacif S. K.J., Myrzakulov R. and Myrzakul S., Reconstruction of cosmic history from a simple parametrization of H // International Journal of Geometric Methods in Modern Physics. – 2017. – Vol.14, No 07. – Art.No 1750111.
- 20 Myrzakul, S., Myrzakulov, R. and Sebastiani, L. Coupled fluids model in FRW space-time //Astrophys Space Sci. – 2014. – Vol. 353. –P. 667-675.
- 21 Esmakhanova, K. Myrzakulov, N., Nugmanova,G. Myrzakulov, Y., Chechin L and Myrzakulov, R. //International Journal of Modern Physics D. – 2011. – Vol.20, No12. – P. 2419-2446.
- 22 Myrzakul, S., Myrzakulov, R. and Sebastiani, L. Inhomogeneous viscous fluids in FRW universe and finite-future time singularities // Astrophys Space Sci. – 2014. – Vol. 350. – P. 845–853.
- 23 Myrzakul, S., Myrzakulov, R. and Sebastiani, L. Inhomogeneous fluids for warm inflation //Astrophys Space Sci. – 2015. – Vol.357. – P.168.
- 24 P. Horava Membranes at Quantum Criticality //JHEP. – 2009. – Vol. 0903, 020.
- 25 P. Horava. Quantum Gravity at a Lifshitz Point // Phys. Rev. D. – 2009. – Vol. 79, 084008.
- 26 P. Horava. Spectral Dimension of the Universe in Quantum Gravity at a Lifshitz Point // Phys. Rev. Lett. – 2009. – Vol. 102, 161301.
- 27 P. Horava. Quantum Criticality and Yang-Mills Gauge Theory // Phys. Lett. B. – 2010. – Vol. 694. – P. 172- 176.
- 28 M. Chaichian, S. Nojiri, S. D. Odintsov, M. Oksanen and A. Tureanu, // Class. Quant. Grav. – 2010. – Vol. 27, 185021.
- 29 S. Nojiri, S. D. Odintsov // Phys.Rev. D. – 2005. – Vol. 72:023003.

References

- 1 A.G. Riess, A.V. Filippenko, et al., Astron. J. 116, 1009-1038 (1998).
- 2 S. Perlmutter, G. Aldering, et al. Astrophys. J. 517, 565-586 (1999).
- 3 D.N. Spergel, L. Verde, et al. Astrophys. J. Suppl., 148, 175-194 (2003).
- 4 H.V. Peiris, E. Komatsu, et al. Astrophys. J. Suppl., 148, 213-231 (2003).
- 5 P. Astier, J. Guy, et al. Astron. Astrophys., 447, 31-48 (2006).
- 6 A.G. Riess, L.-G. Strolger, et al. Astrophys. J., 659, 98-121 (2007).
- 7 D.N. Spergel, R. Bean, et al. Astrophys. J. Suppl., 170, 377-408 (2007).
- 8 S.R. Myrzakul, K. Yerzhanov, et al. News of the NAS RK. Series physico-mathematical 5 (327), 11-18 (2019).
- 9 S.R. Myrzakul, Y.M. Myrzakulov, M. Arzimbetova. News of the NAS RK. Series physico-mathematical 5 (333), 106-112 (2020).
- 10 E.N. Saridakis, K.R. Myrzakulov and K.K. Yerzhanov, Physical Review D. 102 (2), 023525 p. (2020).
- 11 R. Myrzakulov and L. Sebastiani, International Journal of Modern Physics D. 25 (4) (2016).
- 12 S.R. Myrzakul et al., Journal of Physics: Conference Series, 1730, 012136 (2021).
- 13 S.K.J. Pacif and R. Myrzakulov, International Journal of Geometric Methods in Modern Physics, 14 (7), 1750111 (2017).
- 14 R. Myrzakulov and L. Sebastiani, Gen. Relativ. Gravit. 49 (7), 90 (2017).
- 15 R. Myrzakulov and L. Sebastiani, European physical journal plus, 132 (10), 5433 (2017).
- 16 R. Myrzakulov and L. Sebastiani, European physical journal plus, 132 (12), 514 (2017).
- 17 E.N. Saridakis, K.R. Myrzakulov and K.K. Yerzhanov, Physical Review D, 102 (2), 023525 (2020).
- 18 S.R. Myrzakul et al., Journal of Physics: Conference Series 1730, 012021 (2021).
- 19 S.K.J. Pacif, R. Myrzakulov and S. Myrzakul, International Journal of Geometric Methods in Modern Physics, 14 (07) (2017).
- 20 S. Myrzakul, R. Myrzakulov, and L. Sebastiani, Astrophys Space Sci 353, 667–675 (2014).
- 21 K. Esmakhanova, N. Myrzakulov, G. Nugmanova, Y. Myrzakulov, L. Chechin and R. Myrzakulov, International Journal of Modern Physics D, 20 (12), 2419-2446 (2011).
- 22 S. Myrzakul, R. Myrzakulov, and L. Sebastiani, Astrophys. Space Sci 350, 845–853 (2014).
- 23 S. Myrzakul, R. Myrzakulov, and L. Sebastiani, Astrophys Space Sci 357, 168 (2015).
- 24 P. Horava, JHEP 0903, 020 (2009).
- 25 P. Horava, Phys. Rev. D 79, 084008 (2009).
- 26 P. Horava, Phys. Rev. Lett. 102, 161301 (2009).
- 27 P. Horava, Phys. Lett. B694, 172- 176 (2010).
- 28 M. Chaichian, S. Nojiri, S. D. Odintsov, M. Oksanen and A. Tureanu, Class. Quant. Grav. 27, 185021 (2010).
- 29 S. Nojiri, S.D. Odintsov. Phys.Rev. D. 72:023003 (2005).

Ye. Tulekov^{1*} , A.K. Morzabaev¹ , V.S. Makhmutov² 

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, Nur-Sultan

²P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow

*e-mail: yerzhan_ta@mail.ru

THE FORBUSH-DECREASES IN COSMIC RAY FLUXES AND SOLAR-PROTON EVENTS IN JULY AND SEPTEMBER 2017

The study of the nature of variations in cosmic ray fluxes, including diurnal, 27-day, annual, etc., and the question of the relationship of solar-geophysical factors on the state of the atmosphere attracts special attention of scientists. Coronal mass ejections are the result of solar winds generated on the Sun during a series of flares. At the same time, solar winds provoke variations in the intensity of cosmic rays, which include, in particular, Forbush-decreases. The article presents brief characteristics of the CARPET detector of the scientific cosmophysical complex of the L.N.Gumilyov ENU and experimental data obtained at this facility during the observation of Forbush-decreases in July and September 2017. The results of the analysis of variations in cosmic ray fluxes are presented and their relationship with the conditions in the interplanetary medium and the Earth's magnetosphere caused by processes on the Sun is described. It was found that the decrease in cosmic ray fluxes in July and September 2017 was due to high solar activity (a series of solar flares). A comparative analysis of the time changes recorded by the CARPET detector modules of the L.N.Gumilyov ENU scientific complex with the data of the world network of neutron monitors («Apatity», «Almaty» and «Jungfraujoch IGY») is also presented. Data on the electromagnetic environment of interplanetary space during the period of heliospheric and magnetospheric disturbances were also used for the analysis. The analysis showed that the measurement data of the CARPET detector is in good agreement with the data of the above-mentioned neutron monitors of the world network, which allows us to study the physical nature of cosmic ray variations for different time intervals.

Key words: The Forbush-decrease, the variation of cosmic rays, solar activity, neutron monitor, magnetosphere, magnetic field.

Е.А. Төлеков^{1*}, А.К. Морзабаев¹, В.С. Махмутов²

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Султан қ.

²Ресей ғылым академиясының П.Н. Лебедев атындағы Физикалық институты, Ресей, Мәскей қ.

*e-mail: yerzhan_ta@mail.ru

2017 жылғы шілде мен қыркүйектегі ғарыштық сәулелер ағындарының, Форбуш-төмендеуі және Күн-протон оқиғалары

Ғарыштық сәулелер ағындарының, оның ішінде тәуеліктік, 27 күндік, жылдық, және т.б. өзгеру табиғатын зерттеу және күн-геофизикалық факторлардың атмосфераның күйіне қатынасы туралы мәселе ғалымдардың ерекше назарын аударады. Күндегі бірқатар алау кезінде пайды болатын күн желі массаның короналды шығарылымдардың нәтижесі болып табылады. Сонымен қатар, күн желдері ғарыштық сәулелердің қарқындылығының өзгеруін тудырады, оған атап айтқанда Форбуш-төмендеу жатады. Мақалада Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеттегі CARPET ғылыми космофизикалық кешенінде детекторының қысқаша сипаттамалары және осы қондырғы арқылы 2017 жылдың шілде, қыркүйек айларында форбуш-төмендеудерді бақылау кезеңінде алынған эксперименттік деректер көлтірілген. Ғарыштық сәуле ағындар өзгеруінің талдау нәтижелері көлтірілген және Күндегі процестерден туындаған планетааралық ортадағы және жер магнитосферадағы жағдайлармен байланысы сипатталған. 2017 жылдың шілде және қыркүйек айларда ғарыштық сәулелер ағындарының азаюы жоғары күн белсенділігімен (Күн сәулемесінің сериясы) байланысты екендігі анықталды. Сондай-ақ, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ CARPET ғылыми кешеніндегі детектор модульдерінде тіркелген уақытша өзгерістері өлемдік нейтрондық мониторлар («Апатиттер», «Алматы» және «Jungfraujoch IGY») желісінің деректерімен салыстырмалы талдауы ұсынылды. Талдау үшін гелиосфералық және магнитосфералық ауытқулар кезеңіндегі планетааралық кеңістіктің электромагниттік ортасы туралы мәліметтер де қолданылды. Талдау көрсеткендей, CARPET детекторының өншеу деректері жоғарыда аталған өлемдік нейтронды мониторлар желінің мәліметтерімен жақыс сәйкес келеді, бұл әр түрлі уақыт

аралықтары үшін ғарыштық, сәулелердің өзгеруінің физикалық табиғатын зерттеуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: Форбуш-төмендеу, ғарыштық сәулелердің вариациясы, құн белсенділігі, нейтрондық монитор, магнитосфера, магнит өрісі.

Е.А. Тулеков^{1*}, А.К. Морзабаев¹, В.С. Махмутов²

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, г. Нур-Султан

²Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Россия, г. Москва

*e-mail: yerzhan_ta@mail.ru

Форбуш-понижения потоков космических лучей и солнечно-протонные события в июле и сентябре 2017 года

Изучение природы вариации потоков космических лучей, в том числе суточных, 27-дневных, годовых и т.д., и вопроса взаимосвязи солнечно-геофизических факторов на состояние атмосферы привлекает особое внимание ученых. Корональные выбросы массы являются результатом солнечных ветров, возникших на Солнце во время серии вспышек. При этом, солнечные ветра провоцируют вариации интенсивности космических лучей, к которым относится, в частности, Форбуш-понижения. В статье представлены краткие характеристики детектора CARPET научного космофизического комплекса ЕНУ им. Л.Н. Гумилева и экспериментальные данные, полученные на данной установке в период наблюдения форбуш-понижений в июле и сентябре 2017 года. Приведены результаты анализа вариаций потоков космических лучей и описана их связь с обстановками в межпланетной среде и земной магнитосфере, вызванными процессами на Солнце. Установлено, что уменьшения потоков космических лучей в июле и сентябре 2017 года были обусловлены высокой солнечной активностью (серия вспышек на Солнце). Представлен также сравнительный анализ временных изменений, зарегистрированных модулями детектора CARPET научного комплекса ЕНУ им. Л.Н. Гумилева с данными мировой сети нейтронных мониторов («Апатиты», Алматы и «Jungfraujoch IGY»). Для анализа использовались также данные об электромагнитной обстановке межпланетного пространства в период гелиосферных и магнитосферных возмущений. Анализ показал, что данные измерений детектора CARPET хорошо согласуются с данными вышеуказанными нейтронными мониторами мировой сети, которое позволяет исследовать физическую природу вариаций космических лучей для разных временных интервалов.

Ключевые слова: Форбуш-понижение, вариация космических лучей, солнечная активность, нейтронный монитор, магнитосфера, магнитное поле.

Introduction

Cosmic rays (CR) play a significant role in atmospheric processes associated with weather and climate. Therefore, the study on different time scales (daily, 27-day, seasonal, annual, etc.) of the physical nature of variations in secondary CR fluxes caused by atmospheric processes is very important.

The issue of the impact of various manifestations of solar-geophysical factors on the state of the lower atmosphere, weather and climate of the Earth has been the focus of attention of scientists over the past several hundred years [1]. One of the first works on this topic can be attributed to work [2], which establishes an eleven-year periodicity in variations in the average air temperature in the Northern Hemisphere, correlating with eleven-year variations in Wolf numbers. This allowed the author to prove the existence of a connection between solar activity, weather and the Earth's climate.

The relationship between the parameters of the lower atmosphere (the nature of circulation, temper-

ature, pressure) with helio-space factors was noted in a number of works [3,4,5,6].

In addition to the wave radiation of the Sun, the characteristics of the atmosphere are also affected by the fluxes of solar protons with energies of tens and hundreds of MeV [5,6]. According to [5,7], the dynamics of the solar wind affects the nature of the ionosphere and the current density in the global electric circuit.

During solar flares, solar winds are disturbed, which in turn accompany coronal mass ejections. Solar winds influence galactic CR fluxes and thereby provoke CR intensity variations [8]. Such variations include the Forbush effect (short-term and sharp decrease in the intensity of cosmic rays).

This effect is quite complex, requires study, and has not been fully investigated until now.

Materials and methods

To study cosmic rays, ground-based installations are used that register secondary particles

formed during the interaction of primary CRs with the atmosphere [9].

At the same time, the creation and implementation of experimental ground-based complexes is necessary for carrying out research to study the nature of cosmic ray fluxes modulation.

For this purpose, the L.N. Gumilyov Eurasian National University (ENU), in cooperation with the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, created a cosmophysical complex consisting of a CARPET detector, a neutron detector, and an EFM-100 electrostatic fluxmeter.

The scientific CR detector CARPET was installed at the end of 2015 at the Faculty of Physics and Technology of ENU in Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan ($51^{\circ}10' 48''$ s. w., $71^{\circ}26' 45''$ w. d., height 358 m, geomagnetic circumcision stiffness $R_c \sim 2.9$ GeV) [10]. To increase the measurement accuracy, two modules are installed.

The basis of the CARPET device is gas-discharge cylindrical Geiger counters of the STS-6 type, united into 12 counting units (size $\sim 1.5 \times 1.5$ m), each of which contains 10 counters [11,12, 19]. The meter block consists of two layers of meters (5 upper and 5 lower), separated by an aluminum absorber (filter) 7 mm thick

The CARPET detects particles with energies: in the channels "UP" and "LOW" – electrons and positrons with energies $E > 200$ keV, protons with $E > 5$ MeV, muons with $E > 1.5$ MeV and $E > 20$ keV photons (efficiency less 1%). Channel "TEL" (coincidence) detects more energetic particles: electrons with energy $E > 5$ MeV, protons with $E > 30$ MeV and muons with $E > 15.5$ MeV [13, 20].

Thus, the CARPET, unlike ground-based neutron monitors, is sensitive to all charged particles, including the low-energy charged secondary CR component formed by primary galactic and solar CRs in the Earth's atmosphere and/or other processes in the near-ground atmosphere.

Results and discussion

This paper examines the Forbush decreases observed in July and September 2017 against the background of a strong geomagnetic storm. For the analysis, we used data from the world network of neutron monitors, as well as data on the electromagnetic environment of interplanetary space during the period of heliospheric and magnetospheric disturbances [14-17].

Figures 1 and 2 show the results of a comparative analysis of temporal changes of registered modules 1 and 2 of the CARPET detector

and data obtained using neutron monitors Apacity (curve 1, the Polar geophysical Institute, Russia, 67.57° N, 33.39° E, geomagnetic rigidity of circumcision $R_c = 0.65$ GW), Almaty (curve 2, Institute of ionosphere, Kazakhstan, 43.1° S, 76.6° E, $R_c = 6.69$ GW) and "Jungfraujoch IGY" (curve 3, Switzerland, 46.55° N, 7.98° E $R_c = 4.49$ GW) in the period from 10 July to 20 July 2017 and for the period from 1 September to 15 September 2017 [14].

During these periods, a series of Forbush decreases in the CR intensity observed by the global network of ground-based neutron monitors were recorded.

Experimental data from the CARPET detector and neutron monitors in July and September 2017 showed that the CR flux in the surface atmosphere decreased, which is due to high solar activity (a series of solar flares).

Thus, a series of solar flares occurred in the active region of the Sun NOAA2665 (S06W 29) from July 14 to 16 [15, 16].

In July 2017, a significant decrease in the CR flux is observed (Fig. 3) with an onset in the second half of July 16 and a subsequent continuation of the series on July 17. The CR decreases fall on the phase of the geomagnetic storm, when the value of the geomagnetic hourly index D_{st} decreased to -72 nT on July 16 at 15 UT and -61 nT on July 17 at 16 UT, the planetary geomagnetic index K_p reached 6.0 on July 16 (18-20 UT) and 5.7 July 17 (15-17 UT). The maximum solar wind plasma velocity V_{sw} falls on the second half of July 16 and was 625 km/s. On July 16, the critical values of the magnetic field B and B_z reached 23.7 and -20.2 nT, respectively, and the magnetic field density n increased to 43.8 N/cm³ at 7 UT.

According to the measurements of the GOES-13 satellite (Fig. 4), the arrival of fluxes of low-energy (< 10 MeV) solar protons was registered from July 14 at ≈ 3 UT and is observed until July 16. The source of these particles is a series of M-class flares. More energetic solar protons with energies above 100 MeV have not been observed.

Forbush-decrease was also observed in September 2017. It was caused by high solar flare activity in the NOAA 12673 area (S 11W 16) from September 4 to September 10 [15, 16, 18]. A decrease in the CR intensity with an amplitude of $\approx 2\%$ occurs on September 7 with the onset of interplanetary disturbances and a geomagnetic storm. Further, on September 8, there is a significant decrease in the intensity of CR flows on all ground monitors, including the CARPET detector.

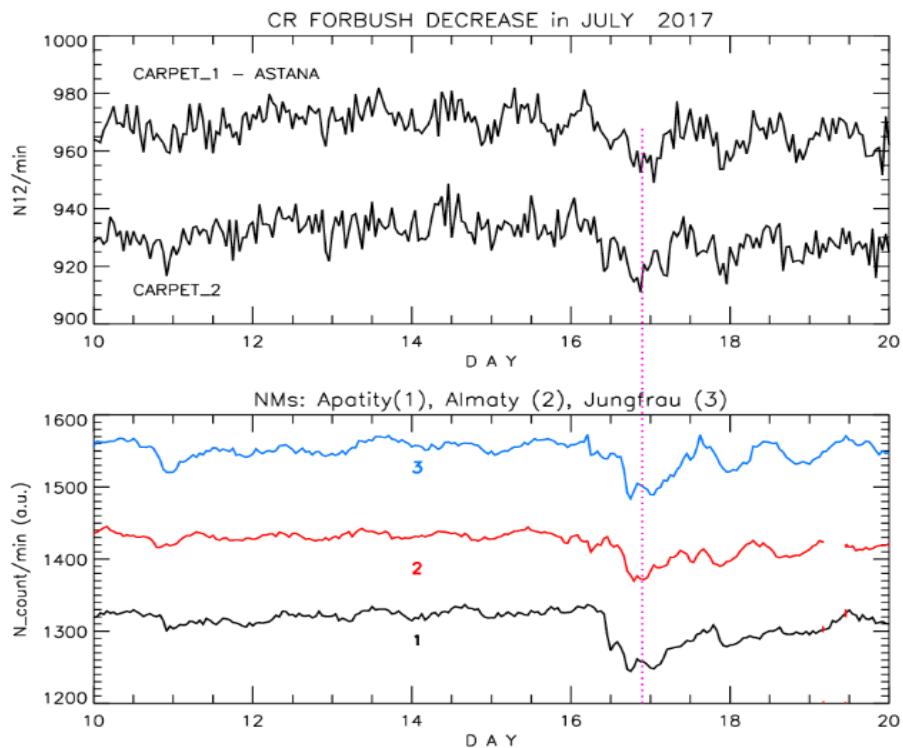


Figure 1 – Counting rate in TEL channels of two CARPET detector modules
(Forbush effect, July 2017)

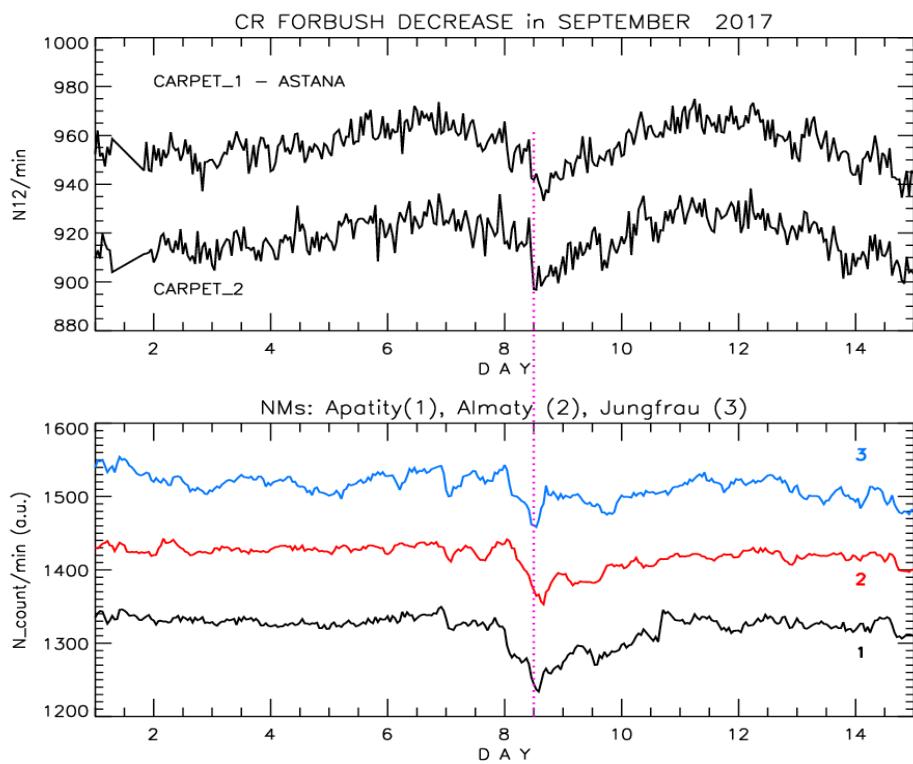


Figure 2 – Counting rate in the TEL channels of two CARPET detector modules
(Forbush effect, September 2017)

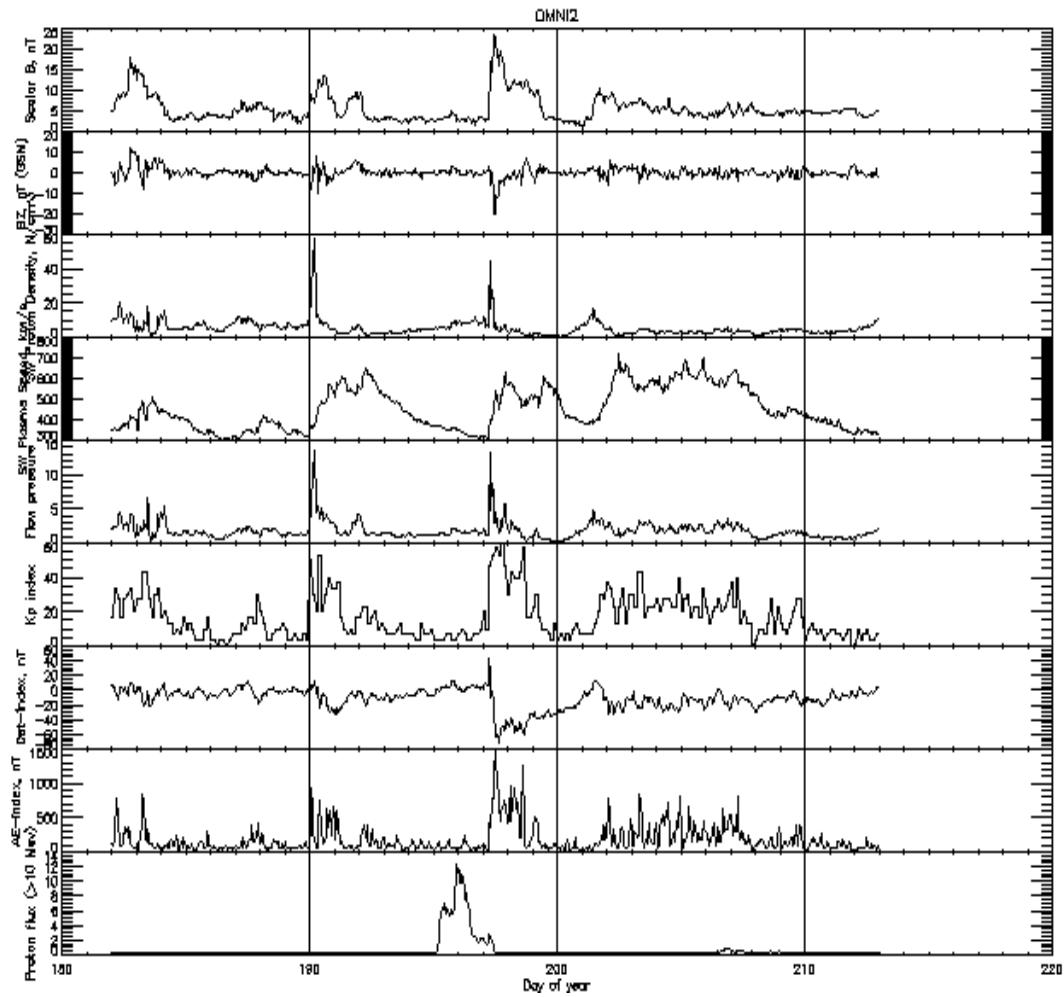


Figure 3 – Changes in the values of the interplanetary magnetic field for 01.07.2017 – 31.07.2017

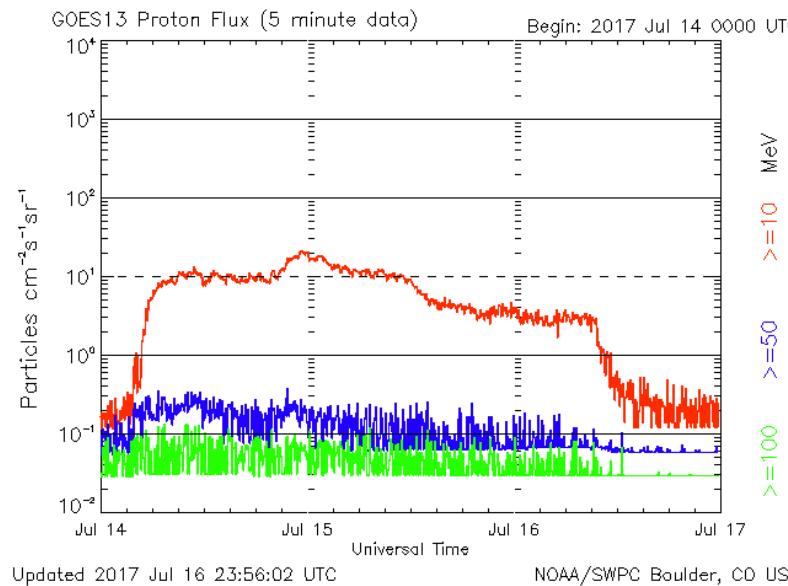


Figure 4 – Fluxes of solar protons according to the measurements of the GOES-13 satellite in the period from 14.07.2017 to 17.07.2017.

On September 8, 2017, the D_{st} value decreased to -142 nT (1 UT), and the three-hour planetary geomagnetic index K_p was high until September 9 (from 4.7 to 8.3), the maximum value (8.3) reached September 8 at 12-14 UT. The solar wind plasma

velocity reached 817 km/s (September 8 at 8 UT). The critical values of the magnetic field B and B_z reached 27.3 and -24.2 nT, respectively, the magnetic field density $-n$ on September 7 was 13.9 N/cm^3 (Fig. 5).

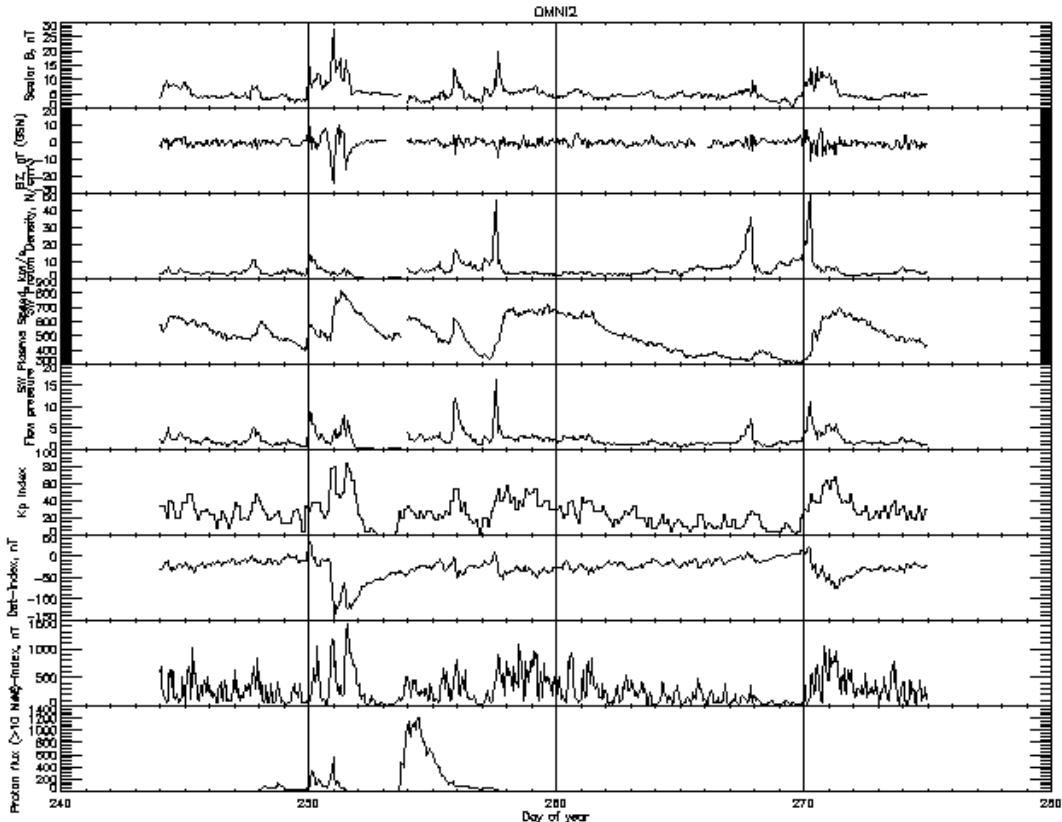


Figure 5 – Changes in the values of the interplanetary magnetic field for 01.09.2017-31.09.2017

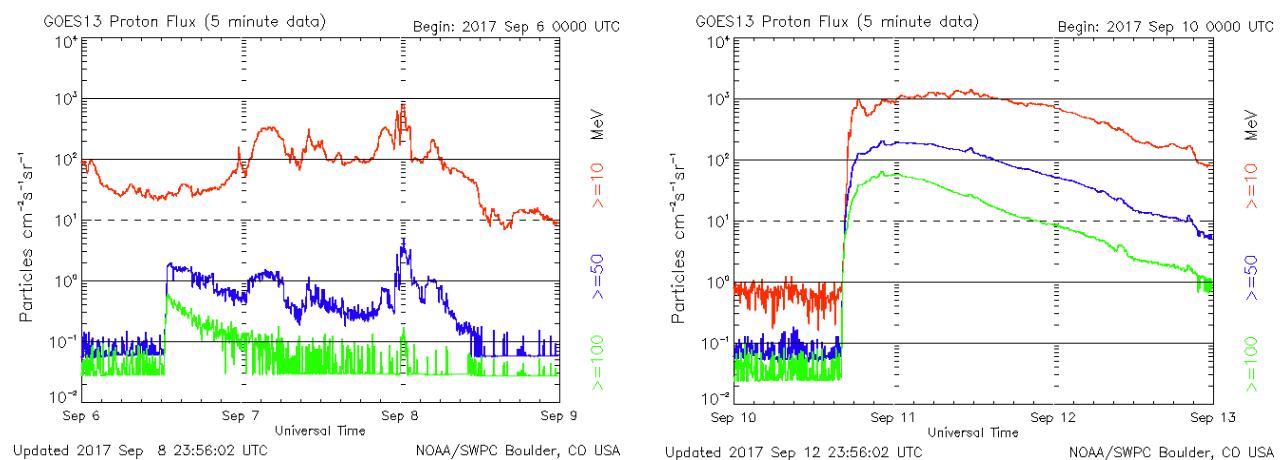


Figure 6 – Solar proton fluxes according to the data of the GOES-13 satellite measurement in the period from 06.09.2017 to 13.09.2017.

According to the GOES-13 satellite (Fig. 6), the proton flux peaks fall on September 8 and 11, 2017. On September 10, a powerful solar-proton event was observed at \approx 15-16 UT, where the proton flux increased in a wide energy range (from 10 MeV to $>$ 100 MeV) [15].

The measurement data using the CARPET detector of the scientific complex of the L.N. Gumilyov ENU agree well enough with the measurement data on neutron monitors Apatity, Jungfrau and Almaty.

Conclusions

The results obtained confirmed and showed that variations in CR intensity (Forbush-decreases) are due to previous changes in the elements of the geomagnetic field caused by perturbations on the Sun.

The analysis of the obtained experimental data of the installed and debugged CARPET detector of the scientific complex of the L.N. Gumilyov ENU and their correlation with the results of ground-based neutron monitors shows that the detector makes it possible to study the nature of CR variations for different time intervals, including for observations of Forbush-decreases.

Acknowledgment

The authors would like to express their sincere gratitude to the NMDB team (www.01.nmdb.eu), for providing data to the ground-based neutron monitor network and NOAA (<https://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>) for publishing the results of observations of solar and geomagnetic activity.

References

- 1 Тулеков Е.А., Дюсембекова А.С., Морзабаев А.К. Фарыштық сәулелердің атмосфераның төменгі қабаттарындағы вариацияларын зерттеу // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Новые возможности развития в условиях четвертой промышленной революции». – Астана, 2018. – Т 65 – С. 124-127.
- 2 Koppen W. On temperature cycles // Nature. – 1873. – Vol. 9. – P. 184-185.
- 3 Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., Variations of the cosmic rays as one of the possible links between the solar activity and the lower atmosphere //Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin). – 1996. – Vol. 17. – P. 161-164.
- 4 Veretenenko S.V., Pudovkin M.I., Cosmic ray variation influence on the total radiation fluxes in the lower atmosphere //Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin). – 1997. – V. 20. – P. 1173-1176.
- 5 Vovk V.Ya., Egorova L.V., Moskvin I.V., Influence of the ground-level increase of cosmic rays on the parameters of the atmosphere in the antarctic region //Geomagnetism and Aeronomy. – 1999. – Vol. 39. – P. 372-375.
- 6 Makarova L.N., Shirochkov A.V., Koptyaeva K.V., The earth's magnetopause as an element of a global electric circuit //Geomagnetism and Aeronomy. – 1998. – Vol. 38. – P. 384-385.
- 7 Tinsley B. A., Deen G. W., Apparent tropospheric response to MeV–GeV particle flux variations: a connection via electro-freezing of supercooled water in high-level clouds // J. Geophys. Res. – 1991. – Vol. 96. – P. 283-296.
- 8 Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А. и др. //Изв. РАН. Сер. физ. – 2001. – Т. 65, № 3. –С. 373.
- 9 Дорман Л.И., Фейнберг Е.Л. Вариации космических лучей // УФН. – 1956. – Т. 59, № 2. – С. 189-228.
- 10 Morzabaev A.K., Giniyatova Sh.G., Shakhanova G.A., Makhmutov V.S. Evaluation of CARPET hardware and software potentialities //Bull. Univ. Karaganda. Phys. – 2018. – Vol. 2(90). – P. 81-87.
- 11 Mizin S.V., Makhmutov V.S., Maksumov O.S., Kvashnin A.N. Application of multithreading programming to physical experiment //Kratk. Soobshch. Fiz. – 2011. – Vol. 38, No 2. – P. 9-17
- 12 Maghrabi A., Makhmutov V.S., Almutairi M., Aldosari A., Altilasi M., Philippov M.V., Kalinin E.V. Cosmic ray observations by CARPET detector installed in central Saudi Arabia – preliminary results //J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2020. – Vol. 200. – Art.No 105194.
- 13 Philippov M. V., Makhmutov V. S., Stozhkov Yu. I., Maksumov O.S., Bazilevskaya G.A., Morzabaev A.K., Tulekov Ye.A. Characteristics of the ground-based «CARPET-ASTANA» instrument for detecting charged component of cosmic rays and preliminary analysis of the first experimental data //Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. – 2020. – Vol. 959. – Art.No 163567.
- 14 Neutron monitor database: www.nmdb.eu
- 15 SWPC Forecast Center: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/>
- 16 <https://www.solarmonitor.org>
- 17 <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>
- 18 Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I., Philippov M.V., Kalinin E.V. Solar Activity and Cosmic Ray Variations in September 2017 //Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2019. – Vol. 83. – P. 543-546.
- 19 Tulekov E.A., Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I., Morzabaev A.K., Philippov M.V., Erkhov V.I., and Dyusembekova A.S. Ground-based Instrument for the Study of Cosmic Ray Variation in Nur-Sultan //Geomagnetism and Aeronomy. – 2020. – Vol. 60, No. 6. – P. 693-698.
- 20 Tulekov Ye., Morzabaev A.K., Makhmutov V.S., Yerkhov V.I., Philippov M.V. Variations of cosmic rays in the period 2016-2019 according to observations of the ENU experimental complex //Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Physics. Astronomy Series. – 2020. – Vol. 133, №4. – P. 79-95.

References

- 1 Ye. Tulekov at al., Int. Sci. and Pract. Conf. «New Opportunities for Development in the conditions of the 4th Industrial Revolution» (Astana, 21 November, 2018), 124-127 (2018). (in Russ).
- 2 W. Koppen, Nature. 9, 184-185 (1873).
- 3 M.I. Pudovkin and S.V. Veretenenko, Advances in Space Research, 17, 161-164 (1996).
- 4 S.V. Veretenenko and M.I. Pudovkin, Advances in Space Research, 20, 1173-1176 (1997).
- 5 V.Ya. Vovk, L.V. Egorova, and I.V. Moskvin, Geomagnetism and Aeronomy, 39, 372-375 (1999).
- 6 L.N. Makarova, A.V. Shirochkov, and K.V. Koptyaeva, Geomagnetism and Aeronomy, 38, 384-385 (1998).
- 7 B.A. Tinsley and G.W. Deen, J. Geophys. Res., 96, 283-296 (1991).
- 8 A.V. Belov at al., Izv. RAN. Ser. fiz., 65(3), 373 (2001) (in Russ)
- 9 L.I. Dorman and Ye.L. Feinberg, UFN, 59(2), 189-228 (1956) (in Russ).
- 10 A.K. Morzabaev, Sh.G. Gimiyatova, G.A. Shakhanova, and V.S. Makhmutov, Bull. Univ. Karaganda. Phys., 2(90), 81-87 (2018).
- 11 S.V. Mizin, V.S. Makhmutov, O.S. Maksumov and A.N. Kvashnin, Kratk. Soobshch. Fiz., 38(2), 9-17 (2011).
- 12 A. Maghrabi, V.S. Makhmutov, M. Almutairi, A. Aldosari, M. Altilasi, M.V. Philippov and E.V. Kalinin, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 200, 105194 (2020).
- 13 M.V. Philippov, V.S. Makhmutov, Yu.I. Stozhkov, O.S. Maksumov, G.A. Bazilevskaya, A.K. Morzabaev, and Ye.A. Tulekov, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A., 959, 163567 (2020).
- 14 Neutron monitor database: www.nmdb.eu
- 15 SWPC Forecast Center: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/>
- 16 <https://www.solarmonitor.org>
- 17 <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>
- 18 V.S. Makhmutov, G.A. Bazilevskaya, Y.I. Stozhkov, M.V. Philippov and E.V. Kalinin, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., 83, 543-546 (2019).
- 19 E.A. Tulekov, V.S. Makhmutov, G.A. Bazilevskaya, Yu.I. Stozhkov, A.K. Morzabaev, M. V. Philippov, V.I. Erkhov, and A.S. Dyusembekova, Geomagnetism and Aeronomy, 60(6), 693-698 (2020).
- 20 Ye. Tulekov, A.K. Morzabaev, V.S. Makhmutov, V.I. Yerkhov, and M.V. Philippov., Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Physics. Astronomy Series. 133(4), 79-95 (2020).

А.Б. Алтайбаева* , К.К. Ержанов , Г.Б. Бауыржан 

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, г. Нур-Султан

*e-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com

ТЕРМОДИНАМИКА И ГЕОМЕТРОТЕРМОДИНАМИКА ЧЕРНЫХ ДЫР РЕЙССНЕРА-НОРДСТРЁМА В МНОГОМЕРНЫХ МОДЕЛЯХ СО СТЕПЕННОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ

В данной статье проанализированы геометрические свойства равновесного многообразия черных дыр на фоне модели более высоких измерений. Как частный случай рассматриваются модели со степенной зависимостью многомерных моделей черных дыр. В этой работе дан общий обзор работ по данной теме. Рассмотрены основные составляющие формализма геометротермодинамики и представлена термодинамика для данной метрики, которая здесь использована для анализа равновесного многообразия конфигураций черных дыр. Основной частью данного исследования является рассмотрение частного случая для изучения термодинамики и геометротермодинамики пятимерной черной дыры Рейснера-Нордстрема в гравитационном поле. Для пятимерной черной дыры Рейснера-Нордстрема определяются точки сингулярности, при которых происходят фазовые переходы второго рода, которые показывают взаимодействия в гравитационном поле. Показано что проявление кривизны рассматриваемой черной дыры с происходящими в ней фазовыми переходами демонстрирует ее поведение в гравитационном поле. Следует отметить, что структура фазового перехода черной дыры может зависеть от выбранного данной модели ансамбля. Следовательно, единственными особенностями во всех рассматриваемых вариантах скаляра кривизны в представлении энтропии, массы и энталпии в зависимости от термодинамических параметров возникают из-за границы применимости термодинамического подхода к черной дыре, где, как предполагается, невозможно применение обычных подходов общей теории относительности.

Ключевые слова: черная дыра Рейснера-Нордстрема, фазовый переход, гравитационное поле, скаляр кривизны.

A.B. Altaybaeva*, K.K. Yerzhanov, G.B. Bauyrzhan

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, Nur-Sultan

*e-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com

Thermodynamics and geometrothermodynamics of Reissner-Nordström black holes in multidimensional power-law models

This article analyzes the geometric properties of the equilibrium variety of black holes on the background of a higher-dimensional model. Models with power-law dependence of multidimensional black hole models are considered as a special case. This work provides a general overview of the work on this topic. The main components of the formalism of geometric thermodynamics are considered and thermodynamics for this metric is presented, which is used here to analyze the equilibrium variety of configurations of black holes. The main part of this study is the consideration of a particular case for the study of thermodynamics and geometrothermodynamics of the Reissner-Nordstrom five-dimensional black hole in a gravitational field. For the five-dimensional Reissner-Nordström black hole, singularity points are determined at which second-order phase transitions occur, which show interactions in a gravitational field. It is shown that the manifestation of the curvature of the considered black hole with phase transitions occurring in it demonstrates its behavior in a gravitational field. It should be noted that the structure of the phase transition of a black hole may depend on the chosen model of the ensemble. Consequently, the only features in all considered scalar versions of curvature in the representation of entropy, mass and enthalpy, depending on thermodynamic parameters, arise from beyond the limits of applicability of the thermodynamic approach to a black hole, where it is assumed that it is impossible to apply the usual approaches of general relativity.

Key words: Reissner-Nordstrom black hole, phase transition, gravitational field, curvature scalar.

А.Б. Алтайбаева*, К.К. Ержанов, Г.Б. Бауыржан

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ.
*e-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com

Көп өлшемді дәрежеге тәуелді модельдердегі Рейсснер-Нордстрем қара құрдымдарының термодинамикасы және геометротермодинамикасы

Бұл мақалада жоғары өлшемді модель аясында қара құрдымдардың тепе-тендік алуан түрінің геометриялық қасиеттері талданады. Ерекше жағдай ретінде көп өлшемді қара құрдым модельдерінің дәрежеге тәуелділігі бар модельдер қарастырылады. Бұл жұмыста осы тақырып бойынша қарастырылған жұмыстарға жалпы шолу жасалынды. Геометриялық термодинамиканың формализмінің негізгі компоненттері қарастырылып, берілген метрика үшін термодинамика келтірілген болып, ол қара құрдымдардың конфигурацияларының тепе-тендік алуан түрлілігін талдау үшін қолданылады. Зерттеудің негізгі бөлігі – гравитациялық өрістегі Рейсснер-Нордстрем бес өлшемді қара құрдымдарының термодинамикасы мен геометротермодинамикасын зерттеуге арналған нақты жағдайды қарастыру. Бес өлшемді Рейсснер-Нордстрем қара құрдымы үшін гравитациялық өрістегі өзара әрекеттесуді көрсететін екінші ретті фазалық ауысулар болатын сингулярлық нүктeler анықталады. Қарастырылған қара құрдымдардың қысауының онда пайда болатын фазалық ауысулармен көрінісі оның гравитациялық өрістегі әрекеттің көрсететіні көрсетілген. Қара құрдымдардың фазалық ауысуының құрылымы ансамбльдің таңдалған моделіне байланысты болуы мүмкін екенін ескеру қажет. Демек, термодинамикалық параметрлерге байланысты энтропияны, массаның және әнталпияны бейнелеудегі қисықтықтың барлық қарастырылған скалярлық нұсқаларындағы жағыз ерекшеліктер термодинамикалық тәсілдің қара құрдымға қолданылу шегінен шығады, мұнда ол болжанған жалпы салыстырмалылықтың әдеттегі тәсілдерін қолдану мүмкін емес екендігін көрсетеді.

Түйін сөздер: Рейсснер-Нордстрем қара құрдымдары, фазалық ауысулар, гравитациялық өріс, қисықтық скаляры.

Введение

В течение последнего столетия важным элементом теоретической физики стала – дифференциальная геометрия стала. Одним наиболее интересным примером этого факта – применение римановой геометрии в общей теории относительности как теории гравитационного поля.

Первые попытки в этом направлении были предприняты в одних их первых работах Гиббса [2] и Каратеодори [3], в которых язык дифференциальных форм был введен в термодинамику. Риманова геометрия была впервые введена в статистическую физику и термодинамику Рао [4] в пятидесятых годах с помощью метрики, компоненты которой в локальных координатах совпадают с информационной матрицей Фишера. Оригинальная работа Рао была продолжена и расширена рядом авторов (Например, [5]). Для изучения геометрии термодинамики обычных систем и черных дыр интенсивно использовались метрики Гессе [6–14]. То, что она инвариантна относительно преобразований Лежандра [15] является дополнительным аспектом классической термодинамики, т.е. свойства данной термодинамической системы не зависят от выбора термодинамического потенциала. Это

свойство [16] учтено в контексте геометрического описания термодинамики.

Доказано, что для корректной обработки преобразований Лежандра и геометрической версии первого закона термодинамики необходимо ввести структуру контактной геометрии в термодинамическое фазовое пространство [17]. Формальный подход геометротермодинамики (ГТД) [16] был предложен для согласованного и лежандрово инвариантного объединения контактной структуры фазового пространства с римановой структурой равновесного пространства. В результате для равновесного пространства получаются римановы метрики, которые уже не являются гессеновскими и инвариантны относительно преобразований Лежандра. Одна из основных целей геометротермодинамики – интерпретировать кривизну равновесного пространства как проявление термодинамического взаимодействия. В случае взаимодействующих систем с нетривиальной структурой фазовых переходов можно было бы полагать, что кривизна не равна нулю и становится сингулярной вблизи точек, где происходят фазовые переходы. Это было показано для всех термодинамических систем, исследованных к настоящему времени [18]. В частности, были подробно исследованы

все конфигурации черных дыр теории Эйнштейна в четырех измерениях.

Предметом интенсивных исследований в последние годы являются решения описывающие черные дыры в больше чем четыре размерностях пространства-времени. Расширение общей теории относительности на более высокие римановы пространства-времена дает больше информации об основных свойствах черных дыр.

В самом деле, в таких многообразиях теорема единственности не может выполняться, так как в рассматриваемые модели появляется возможность включения дополнительных степеней свободы. Например, в пятимерном пространстве-времени вращательная симметрия добавляет еще один угловой момент на вращающемся объекте. [19].

Еще одна особенность многомерных черных объектов относится к топологии горизонта. В четырехмерной конфигурации, горизонт Килинга имеет тривиальную топологию S^2 . Но в пятимерном пространстве-времени, для черных объектов с сингулярностью кольца, топология имеет вид $S^2 \times S^1$, а для черных струн в расширенной супергравитации многомерной ОТО топология принимает вид $S^2 \times R$. Кроме того, структура фазового перехода черных дыр выглядит совершенно иной. Таким образом, размерность пространства диктует выбор теории, задающей процесс фазовых переходов.

Материалы и методы

Для описания термодинамической системы с n степенями свободы, т.е. многомерных черных дыр удобно ввести равновесное пространство E , координаты которых могут быть идентичны расширенной термодинамике в переменных E^a , где $a = 1, \dots, n$. Здесь каждая точка E представляет собой особое состояние равновесия, в котором может существовать система. Понятно, что не каждая точка E может быть занята в данной системе. Множество точек E , которые доступны для конкретной системы, определяются фундаментальным уравнением $\Phi = \Phi(E^a)$, где Φ – термодинамический потенциал [20]. Как правило, термодинамический потенциал Φ не идентичен ни с энтропией S , ни с внутренней энергией системы U . Тем не менее, можно задавать любой термодинамический потенциал, оставляя термодинамические свойства системы без изменений.

Подобную ситуацию можно объяснить выбором равновесного пространства с дифференциально-геометрической структурой в нескольких направлениях. Самый простой способ состоит в введении гессенской метрики в равновесное пространство E

$$g^H = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial E^a \partial E^b} dE^a dE^b, \quad (1)$$

что E становится римановым многообразием. Метрика g^H ведет себя как скаляр при любых изменениях координат E , т.е. при операции отображения координат (диффеоморфизм) $E^a \rightarrow \tilde{E}^a = \tilde{E}^a(E^a)$ с участием только набора координат $\{E^a\}$. Здесь функция Φ может рассматриваться как метод производящих функций гессенской метрики, оно не позволяет рассмотреть изменения термодинамического потенциала.

В данной статье будут анализированы фазовые переходы второго рода для различных конфигураций черной дыры и соответственно будет использована следующая формула

$$G^{II} = (d\Phi - \delta_{ab} I^a dE^b)^2 + (\delta_{ab} E^a I^b)(\eta_{cd} dE^c dI^d), \quad (2)$$

чей кодифференциал приводит к метрике

$$g^{II} = \left(E^a \frac{\partial \Phi}{\partial E^a} \right) \left(\eta_b^c \frac{\partial^2 \Phi}{\partial E^c \partial E^d} dE^b dE^d \right), \quad (3)$$

для равновесного многообразия.

Видно, что этот показатель может быть явно рассчитан только для основного уравнения $\Phi = \Phi(E^a)$. При этом геометрические свойства равновесного многообразия E , описываемые метрикой g^H , должны быть связаны с термодинамическими свойствами системы, описываемый основным уравнением $\Phi(E^a)$. В частности, ожидается, что кривизна системы E с термодинамическим взаимодействием и кривизна сингулярности E находятся в соответствующих фазовых переходах соответствующей термодинамической системы.

Результаты и обсуждение

Черная дыра Рейсснера-Нордстрёма размерности $d = 5$

Решение для заряженной черной дыры Рейсснера-Нордстрёма (РН) без углового момента может быть применено для $d = 5$ размерности. Соответствующая метрика в пятимерном пространство-времени

$$ds^2 = -Vdt^2 + V^{-1}dr^2 + r^2d\Omega_{(3)}^2, \quad (4)$$

где $d\Omega_{(3)}^2$ – является линейным элементом на 3 – мерной единичной сфере, $d\Omega_{(3)}^2 = 2$.

Соответственно для нашего частного случая объем определяется формулой

$$V = 1 - \frac{4\pi G}{3} \left(\frac{2M}{r^2} + \frac{Q^2}{r^4} \right). \quad (5)$$

Рассмотрим частный случай когда $d = 5$ и используем эту размерность для нахождения необходимых уравнений термодинамики и геометротермодинамики [21]. Решая уравнение (9) при $V = 0$, можно найти горизонт событий любой размерности и область соответствующей энтропии.

На рисунке 1 приведена зависимость объема V пятимерной черной дыры РН от его радиуса r , при различных значениях массы и теплоты. Кривая 1 (верхняя) соответствует значениям $M = 1, Q = 0.5$; кривая 2 (средняя) соответствует значениям $M = 2, Q = 1.5$ и кривая 3 (нижняя) значениям $M = 3, Q = 2.5$. Из рисунка видно, что с увеличением радиуса уменьшается объем черной дыры и при различных значениях массы и теплоты этот объем стремится к одному и тому же значению. Это говорит о том что черные дыры что объем черной дыры при увеличении радиуса уменьшается.

Термодинамика черной дыры Рейсснера-Нордстрёма размерности $d = 5$

Далее рассмотрим термодинамику черной дыры Рейсснера-Нордстрёма для случая $d = 5$. Основное уравнение для энтропии запишем в виде

$$S(M, Q) = \left(M + M \sqrt{1 - \frac{3Q^2}{4M^2}} \right)^2. \quad (6)$$

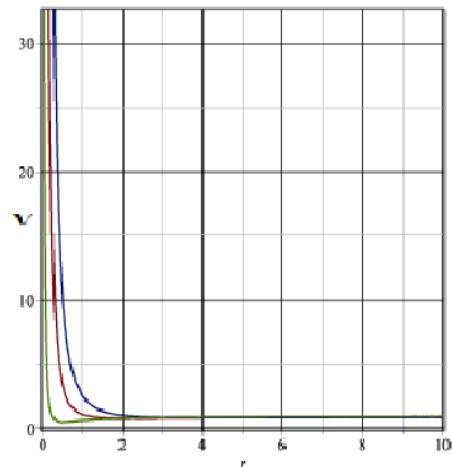


Рисунок 1 – Зависимость объема V четырехмерной черной дыры РН от его радиуса r

Согласно приведенной формуле с увеличением массы энтропия растет, что можно доказать, для необратимого процесса выполняется второй закон термодинамики.

С помощью уравнения (5), получаем функцию массы [21] в виде

$$M(S, Q) = \frac{S^{\frac{2}{3}}}{2} + \frac{3Q^2}{8S^{\frac{2}{3}}}, \quad (7)$$

Данное уравнение удовлетворяет первому закону термодинамики, где Q подразумевается как электрический потенциал. Тогда температура и электрический потенциал [22] примет вид

$$T(S, Q) = \frac{2S - 3Q^2}{S^{\frac{5}{3}}}, \quad \phi(S, Q) = \frac{3}{4} \frac{Q}{S^{\frac{3}{2}}}. \quad (8)$$

Отношение электрического потенциала к массе в экстремальных пределах

$$\left. \frac{Q^2}{M^2} \right|_{\text{экстремал}} = \frac{4}{3} \quad \text{т.е.} \quad \left. \frac{Q^2}{S} \right|_{\text{экстремал}} = \frac{4}{3}, \quad (9)$$

где, электрический потенциал остается постоянным, а температура черной дыры становится равной нулю. Кстати, в экстремальном случае мы получаем соотношение $M^2 = \varphi^2 Q^2$.

Вычисляя функцию, соответствующую потенциальну ϕ для черной дыры РН, можно заметить наличие некоторых точек, в которых,

скорее всего, и происходят фазовые переходы. Теплоемкость при постоянной теплоте запишем как

$$C_Q = \frac{M_S}{M_{SS}} = -\frac{3S(3Q^2 - 4S^{\frac{4}{3}})}{15Q^2 - 4S^{\frac{4}{3}}}, \quad (10)$$

где $M_S = \partial M / \partial S$ и т.д. При экстремальном значении теплоты появляются критические точки, которые показывают взаимодействия черной дыры со Вселенной.

При постоянной энтропии, в черной дыре РН, появляются две функции отклика:

- изоэнтропическая сжимаемость

$$k_S = \frac{M_{QQ}^{-1}}{Q} = \frac{4}{3} \frac{S^{\frac{2}{3}}}{Q}, \quad (11)$$

- изоэнтропическое расширение

$$\alpha_S = \frac{M_{SQ}^{-1}}{Q} = -2 \frac{S^{\frac{5}{3}}}{Q^2}. \quad (12)$$

Как видно из этой формулы, изоэнтропическое расширение имеет отрицательное значение, которая объясняет то, что, черные дыры не расширяются, а наоборот сжимаются [22].

Нужно отметить, что в термодинамике черной дыры РН возможно лишь расхождение теплоемкости, в случае, когда знаменатель (9) равен нулю, т.е., тогда как:

$$\left. \frac{Q^2}{S^{\frac{4}{3}}} \right|_{\text{экстремал}} = \frac{4}{15}. \quad (13)$$

Можно также показать, что это значение находится внутри пространственной области,

занимаемой черной дырой, т.е., при выполнении условия

$$\frac{Q^2}{M^2} \leq \frac{7}{3}. \quad (14)$$

С помощью уравнения (5), перепишем уравнение (12) следующим образом

$$\frac{Q^2}{M^2} = \frac{7}{3}. \quad (15)$$

Следует отметить, что структура фазового перехода черной дыры может зависеть от выбранного ансамбля. Например, если использовать ансамбль соответствующий «энталпии», $H = M - \phi Q$

$$H(S, \phi) = -S^{\frac{2}{3}} \frac{4\phi^2 - 3}{6}, \quad (16)$$

то получаем выражение

$$C_\phi = \frac{H_S}{H_{SS}} = -3S. \quad (17)$$

С, что теплоемкость при постоянном потенциале ϕ имеет особенности, поэтому в этом ансамбле с точки зрения термодинамики не ожидаются фазовые переходы.

Геометротермодинамика черной дыры Рейсснера-Нордстрёма размерности $d = 5$

Учитывая основные уравнения (7), (8) и общую метрику (3), можно, вычислить метрику и скаляр кривизны для черной дыры РН в представлении энтропии и энергетических представлений.

Таким образом, метрика $\Phi = S$ и $E^a = \{M, Q\}$ записывается следующим виде

$$g_s'' = \frac{M \left[2 + \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right]}{6(3Q^2 - 4M^2) \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}}} \left\{ -4 \left[(9Q^2 - 8M^2) \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} + 24Q^2 - 16M^2 \right] dM^2 - \right. \\ \left. - 3 \left[(3Q^2 - 8M^2) \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} - 16M^2 \right] dQ^2 \right\}, \quad (18)$$

скаляр кривизны

$$R_s'' = \frac{3}{M^2} \frac{\mathbf{A}_1(M, Q) + \mathbf{A}_2(M, Q) + \mathbf{A}_3(M, Q) + \mathbf{A}_4(M, Q)}{\left[2 + \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right]^2 \left[24Q^2 + M^2(-16 + \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}}) \right]^2 \mathbf{B}_1(M, Q)}, \quad (19)$$

где,

$$\mathbf{A}_1(M, Q) = 169164M^{12} \left(2 + \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right) + 729Q^{12} \left(7 + 4 \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right), \\ \mathbf{A}_2(M, Q) = 468M^2Q^{10} \left(340 + 127 \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right) - 972M^4Q^8 \left(-79 + 161 \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right), \\ \mathbf{A}_3(M, Q) = -215M^{10}Q^2 \left(411 + 176 \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right) - 216M^6Q^6 \left(16162 + 3565 \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right), \\ \mathbf{A}_4(M, Q) = 288M^8Q^4 \left(30872 + 10921 \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right). \quad (20)$$

и

$$\mathbf{B}_1(M, Q) = \left[9Q^4 + 32M^4 \left(2 + \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right) - 6M^2Q^2 \left(6 - \sqrt{4 - 3 \frac{Q^2}{M^2}} \right) \right]^2 \quad (21)$$

После алгебраических преобразований, находим, что единственный реальный положительный корень знаменателя скаляра кривизны (19) дается решением

$$\left. \frac{M}{Q} \right|_{\text{сингуляр}} = \frac{9}{2\sqrt{15}}, \quad (22)$$

Из уравнений (13) и (2), следует, что на самом деле скаляр кривизны расположен именно в тех точках, где происходят фазовые переходы. Графическое изображение скаляра кривизны представлено на рисунке 2, в котором явно выделены некоторые точки сингулярности.

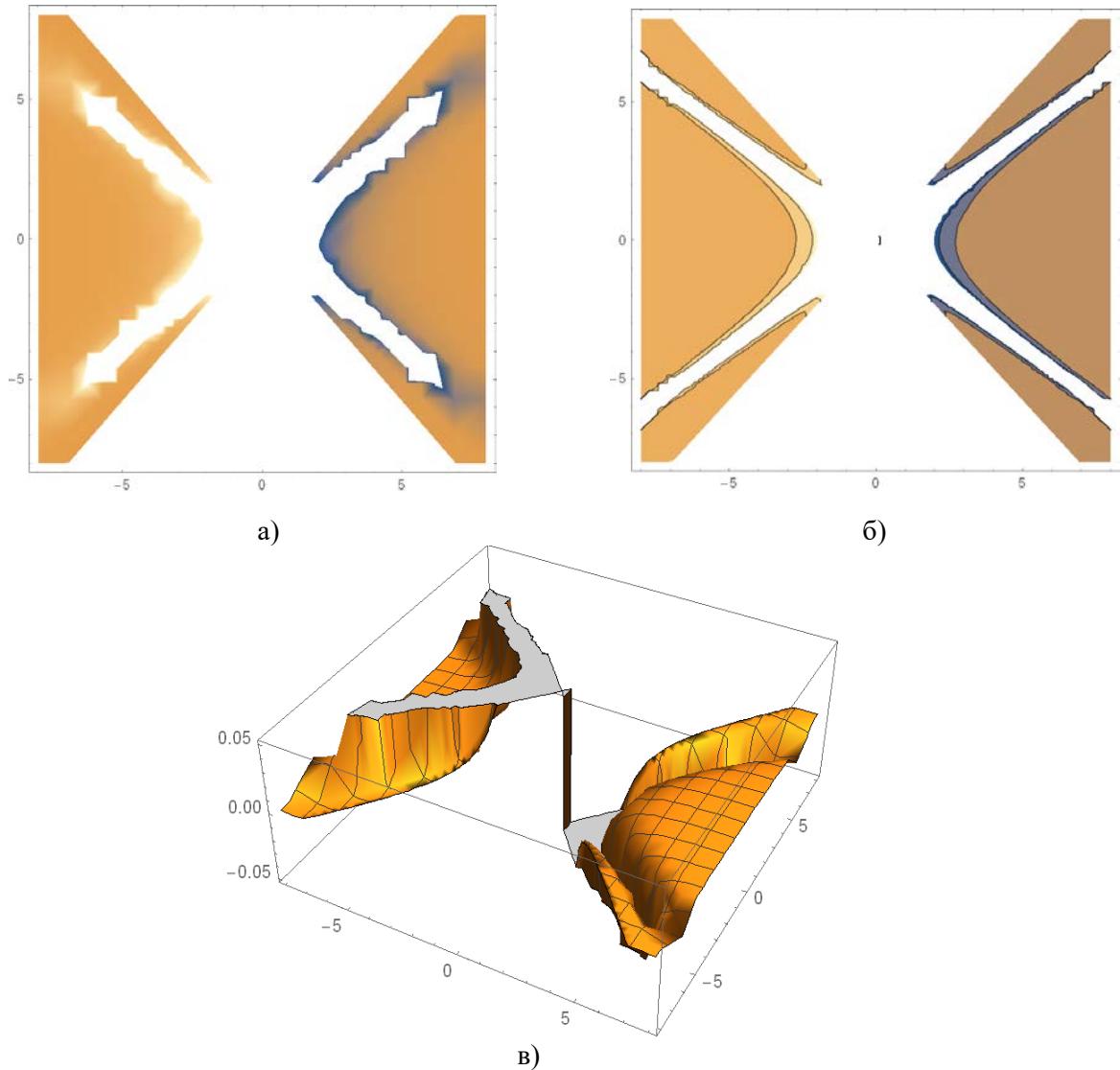


Рисунок 2 – Зависимость скаляра кривизны в представлении энтропии
в зависимости от массы и теплоемкости

На рисунке 2 приведена зависимость скаляра кривизны в представлении энтропии в зависимости от массы и теплоемкости, при значениях массы и теплоты соответственно $M\{-8;8\}$ и $Q\{-8;8\}$. На рисунке 2.а вид сверху, 2.б вид с боку и 2.в общий вид в трехмерном представлении.

Чтобы показать инвариантность вышеприведенных результатов, в качестве термодинамического потенциала используем $\Phi = M$ и $E^a = \{S, Q\}$, удовлетворяющие основному уравнению (16). Тогда из общей термодинамической метрики (3), получаем

$$g_M^{II} = -\frac{45Q^4 + 18Q^2S^{\frac{4}{3}} - 8S^{\frac{8}{3}}}{216S^2} \times dS^2 + \frac{3Q^2 + 4S^{\frac{4}{3}}}{8} dQ^2, \quad (23)$$

с помощью которого вычислим скаляр кривизны

$$R_M^{II} = -\frac{32}{9} \frac{(18225Q^8 + 14580Q^6S^{\frac{4}{3}} + D_1 - D_2 + D_3)}{(3Q^2 + 2S^{\frac{4}{3}})^3(15Q^2S - 4S^{\frac{7}{3}})^2}, \quad (24)$$

где,

$$D_1 = 4S^{\frac{16}{3}}(-32 + 729S^{\frac{4}{3}}),$$

$$D_2 = -6Q^2S^4(56 + 729S^{\frac{4}{3}}),$$

$$D_3 = 9Q^4(-628S^{\frac{8}{3}} + 364S^4),$$

Далее используя алгебраическое преобразование, отметим, что единственными точки расхождения задаются [4] в виде

$$\left. \frac{Q^2}{S^2} \right|_{\text{сингуляр}} = \frac{1}{3}, \quad (25)$$

что совпадает с условием фазовых переходов 2-го рода (13). Отсюда еще раз видна конкретная связь между кривизной метрики (23) и термодинамическим взаимодействием.

Графическое изображение скаляра кривизны, в зависимости от энтропии и теплоты представлено на рисунке 3, где выделены точки сингулярности при значениях энтропии $S \{-8; 8\}$ и теплоты $Q \{-8; 8\}$. На рисунке 3.а вид сверху, 3.б вид с боку и 3.в общий вид в трехмерном представлении.

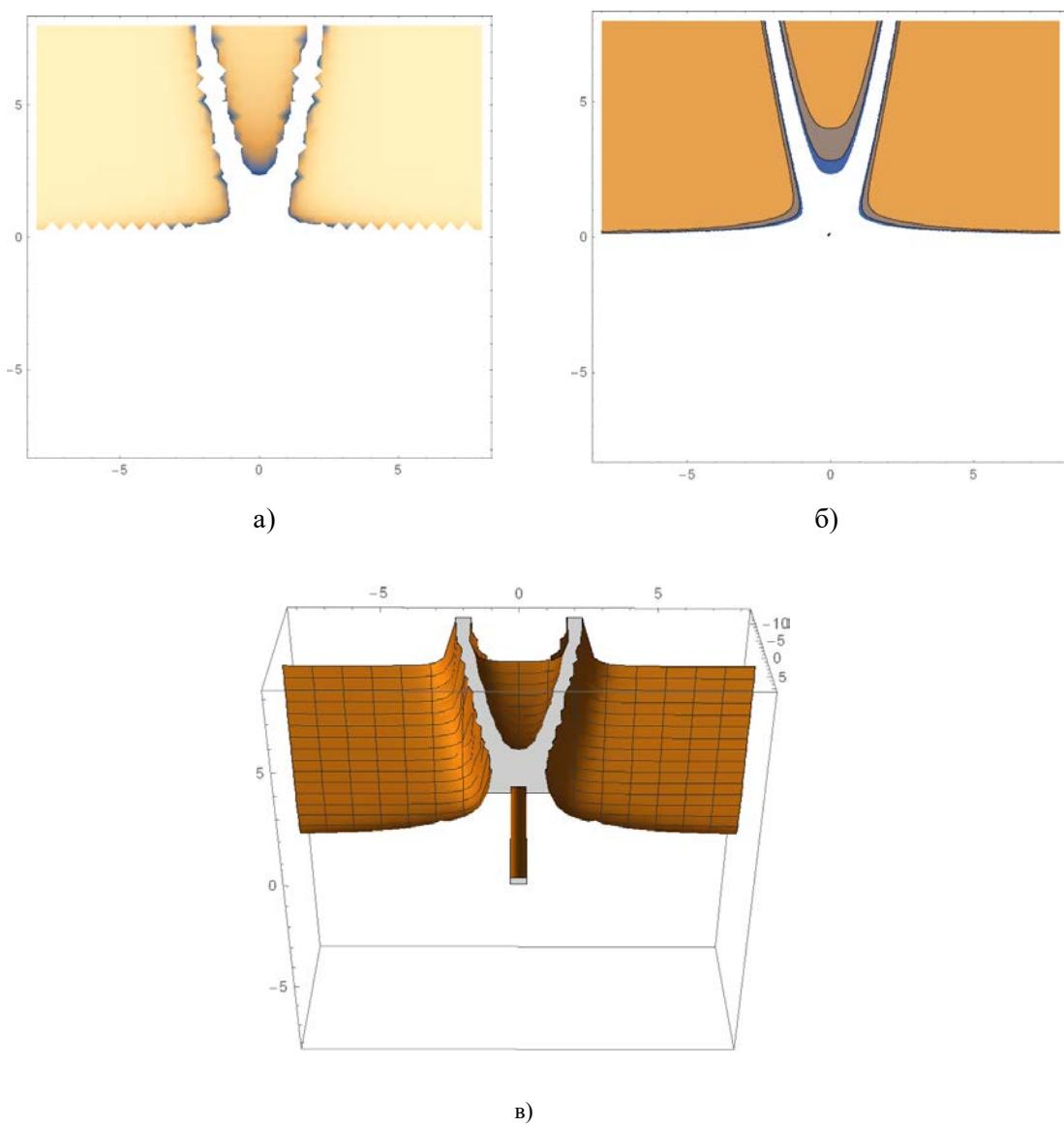


Рисунок 3 – Зависимость скаляра кривизны в представлении массы от энтропии и теплоты

На рисунке 3.а вид сверху, 3.б вид с боку и 3.в общий вид в трехмерном представлении.

Чтобы провести геометродинамический анализ различных ансамблей, воспользуемся метри-

кой и запишем ее с помощью основного уравнения (16), имея в виду, что $\Phi = H$ и $E^a = \{S, \phi\}$. В результате, метрика запишется в виде

$$g_H^{II} = \frac{64\phi^4 - 60\phi^2 + 9}{243S^{\frac{2}{3}}} dS^2 + \frac{(16\phi^2 - 3)S^{\frac{4}{3}}}{27} d\phi^2. \quad (26)$$

Следовательно, скаляр кривизны принимает вид

$$R_H^{II} = \frac{6(-7680\phi^6 + 4096\phi^8 + 81(1 + 144S^{\frac{8}{3}}) + 216\phi^2(-5 + 288S^{\frac{8}{3}}) - 432\phi^4(-11 + 384S^{\frac{8}{3}}))}{(3 - 4\phi^2)^2(-3 + 16\phi^2)^3 S^{\frac{10}{3}}}, \quad (27)$$

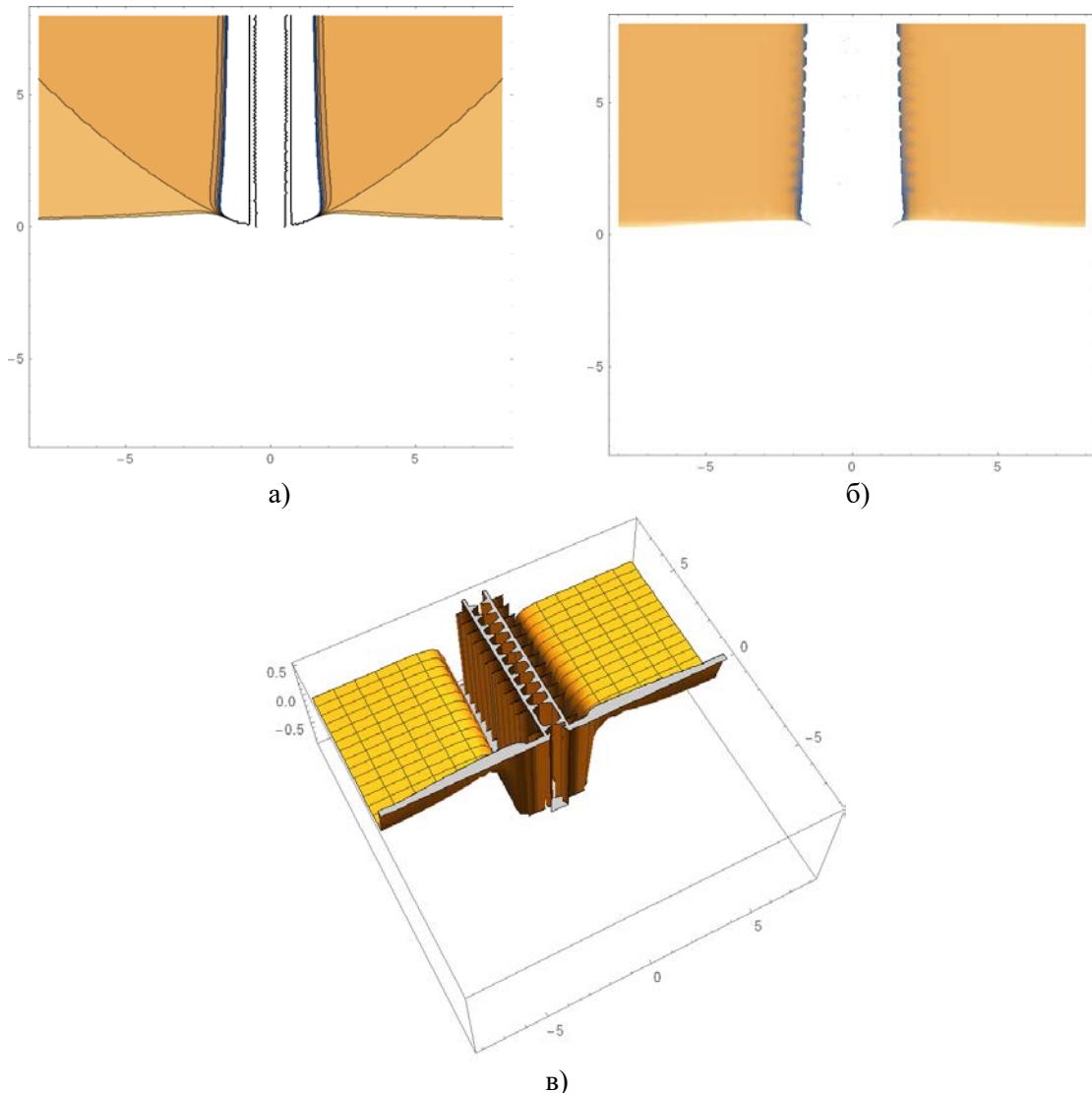


Рисунок 4 – Зависимость скаляра кривизны в представлении энталпии от энтропии и термодинамического потенциала

Таким образом, первый фактор в знаменателе, будучи конформным фактором в метрике (26), равно $SH_S + \phi H_\phi$, который, согласно тождеству Эйлера, пропорционален энталпии H . Первое слагаемое в знаменателе скаляра кривизны равна нулю только тогда, когда термодинамический потенциал равен нулю, следовательно $H=0$. Учитывая уравнение состояния $\phi = \partial M / \partial Q$, второй фактор оказывается равным нулю для $S^2 = Q^4$, который в точности соответствует экстремальному пределу черной дыры (8) с нулевой температурой. Это объясняется тем, что метрика g_H^{II} вырождается в экстремальных пределах. Следовательно, единственны особенности возникают из-за границы применимости термодинамического подхода к черной дыре, где также ожидается, что подход ОТО отрицается. Графическое изображение скаляра кривизны представлено на рисунке 4, где подробно показываются точки сингулярности. На рисунке 4.а вид сверху, 4.б вид с боку и 4.в общий вид в трехмерном представлении.

Выводы

Таким образом в данной статье рассмотрена геометрическая структура пятимерной черной дыры Рейсснера-Нордстрёма. Использован метод формализма геометротермодинамики, который с точки зрения концепции дифференциальной геометрии представляет такие термодинамические свойства, как взаимодействие и фазовые переходы, кривизна и сингулярность. Получены критические точки, которые следуют из анализа расхождений термодинамических функций отклика. В термодинамике черных дыр, критические точки теплоемкости обычно связаны с возникновением фазовых переходов второго рода.

Сначала выведены все критические точки, вытекающие из анализа расходимостей термодинамического отклика функции. В термодинамике черных дыр критическими точками теплоемкости обычно являются связанных с возникновением фазовых переходов второго рода. Здесь проанализировано расхождения всех функций отклика и показано, что геометротермодинамика воспроизводит поведение возле критических точек.

В случае пятимерной черной дыры Рейсснера-Нордстрёма обнаружено, что если использовать ансамбль связанный с массой черной дыры, существует только один фазовый переход второго рода. С другой стороны, если используем ансамбль, связанный с энталпией, фазовые переходы существуют. Это соответствует хорошо известному результату о том, что структура фазовых переходов черных дыр может зависеть от ансамбля. Далее исследованы геометрические свойства соответствующего равновесного пространства с помощью геометротермодинамики с массой в качестве термодинамического потенциала и обнаружено, что сингулярность кривизны появляется именно в этой точке где происходит фазовый переход. В случае, когда использовали энталпию в качестве термодинамического потенциала, геометротермодинамика обеспечивает равновесное многообразие без сингулярностей. Таким образом, можно сделать вывод, что геометротермодинамика правильно воспроизводит структуру термодинамического фазового перехода черной дыры Рейсснера-Нордстрёма.

Благодарность

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан АР08957287.

Литература

- 1 Frankel T., The geometry of physics: An introduction. – Cambridge University Press, 2011
- 2 Gibbs J. W., The collected works, Vol. 1, Thermodynamics. – New York: Dover Publications, 1961
- 3 Caratheodory C., Untersuchungen über die Grundlagen der Thermodynamik // Mathematische Annalen. – 1909. – Vol. 67. – P. 355–386.
- 4 Rao C.R. Information and the Accuracy Attainable in the Estimation of Statistical Parameters // Bulletin of Calcutta Mathematical Society. – 1945. – Vol. 37. – P. 81–91.
- 5 Amari S., Differential-Geometrical Methods in Statistics – Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- 6 Aman J.E., Bengtsson I. and Pidokrajt N., Geometry of black hole thermodynamics // General Relativity and Gravitation – 2003. – Vol. 35. – P. 1733.
- 7 Aman J.E., Pidokrajt N. Geometry of higher-dimensional black hole thermodynamics // Physical Review D. – 2006. – Vol. 73. – P. 024017

- 8 Aman J.E., Pidokrajt N. Flat Information Geometries in Black Hole Thermodynamics // General Relativity and Gravitation. – 2006. – Vol. 38. – P. 1305-1315.
- 9 Shen J., Cai R.G., Wang B. and Su R.K., Thermodynamic Geometry and Critical Behavior of Black Holes // International Journal of Modern Physics A – 2007. – Vol. 22. – P.11-27.
- 10 Cai R.G. and Cho J. H., Thermodynamic curvature of the BTZ black hole // Physical Review D – 1999. – Vol. 60. – P. 067502.
- 11 Sarkar T., Sengupta G. and Tiwari B.N., On the thermodynamic geometry of BTZ black holes // J. High Energy Phys. – 2006. – Vol. 11. ArtNo 015.
- 12 Medved A.J.M., A commentary on ruppeiner metrics for black holes // Modern Physics Letters A– 2008. – Vol. 23. – P. 2149-2161.
- 13 Mirza B. and Zamaninasab M., Ruppeiner geometry of RN black holes: flat or curved? // J. High Energy Phys. – 2007. – Vol. 06. Article 059
- 14 Quevedo H., Geometrothermodynamics of black holes //General Relativity and Gravitation. – 2008. – Vol. 40. – P. 971-984.
- 15 Callen H.B. «Thermodynamics and an Introduction to Thermostatics». – New York: John Wiley and Sons, 1985.
- 16 Quevedo H. Geometrothermodynamics //Journal of Mathematical Physics. – 2007. – Vol. 48, №1.
- 17 Hermann R., Geometry, physics and systems. – New York: Marcel Dekker, 1973.
- 18 Quevedo H., S'anchez A., Taj S. and V'azquez A., Phase transitions in geometrothermodynamics // General Relativity and Gravitation. – 2011. – Vol. 43. – P. 1153-1165.
- 19 Hartnoll S.A., Herzog C.P., Horowitz G.T., Building a Holographic Superconductor //Physical Review Letters – 2008. – Vol. 101. – P. 031601.
- 20 Liu Y., Pan Q., Wang B. Holographic superconductor developed in BTZ black hole background with backreactions // Physics Letters B – 2011. – Vol. 702. – P. 94–99.
- 21 Bravetti A., Momeni D., Myrzakulov R., Quevedo H. Geometrothermodynamics of higher dimensional black holes // General Relativity and Gravitation. – 2013. – Vol. 45, №8. – P.1603-1617.
- 22 Алтайбаева А.Б. Геометродинамика некоторых топологических объектов: Монография. – Нур-Султан, 2019. – 147 с.

References

- 1 T. Frankel, The geometry of physics: An introduction, (Cambridge University Press, 2011).
- 2 J.W. Gibbs, The collected works, Vol. 1, Thermodynamics, (New York: Dover Publications, 1961).
- 3 C. Caratheodory, Mathematische Annalen 67, 355–386 (1909).
- 4 C.R. Rao, Bulletin of Calcutta Mathematical Society 37, 81–91 (1945).
- 5 S. Amari, Differential-Geometrical Methods in Statistics, (Springer-Verlag, Berlin, 1985).
- 6 J.E. Aman, Bengtsson I. and Pidokrajt N., General Relativity and Gravitation, 35, 1733 (2003).
- 7 J.E. Aman, N. Pidokrajt, Physical Review D 73, 024017 (2006).
- 8 J.E. Aman, N. Pidokrajt, General Relativity and Gravitation, 38, 1305-1315 (2006).
- 9 J. Shen, R.G. Cai, B. Wang and R.K. Su, International Journal of Modern Physics A 22, 11-27 (2007).
- 10 R.G. Cai and J.H. Cho., Physical Review D 60, 067502 (1999).
- 11 T. Sarkar, G. Sengupta and B.N. Tiwari, J. High Energy Phys., 11, 015 (2006).
- 12 A.J.M. Medved, Modern Physics Letters A 23, 2149-2161 (2008).
- 13 B. Mirza and M. Zamaninasab, J. High Energy Phys., 06, 059 (2007).
- 14 H. Quevedo, General Relativity and Gravitation, 40, 971-984 (2008).
- 15 H. B. Callen, Thermodynamics and an Introduction to Thermostatics, (New York: John Wiley and Sons, 1985).
- 16 H. Quevedo, Journal of Mathematical Physics, 48 (1) (2007).
- 17 R. Hermann, Geometry, physics and systems, (New York: Marcel Dekker, 1973).
- 18 H. Quevedo, et al, General Relativity and Gravitation, 43, 1153-1165 (2011).
- 19 S.A. Hartnoll, C.P. Herzog, G.T. Horowitz, Physical Review Letters, 101, 031601 (2008).
- 20 Y. Liu, Q. Pan, B. Wang, Physics Letters B, 702, 94–99 (2011).
- 21 A. Bravetti, D. Momeni, R. Myrzakulov, H. Quevedo, General Relativity and Gravitation, 45 (8), 1603-1617 (2013).
- 22 A.B. Altaybaeva, Geometrodynamics of some topological objects: Monograph, (Nur-Sultan, 2019), 147 p.

2-бөлім

ПЛАЗМА ФИЗИКАСЫ

Section 2

PLASMA PHYSICS

Раздел 2

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

A.B. Tazhen^{1*}  **M.K. Dosbolayev²** 

¹Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

²Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical Physics, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: aigerim_kz271295@mail.ru

MEASURING THE SELF-GENERATED MAGNETIC FIELD AND THE VELOCITY OF PLASMA FLOW IN A PULSED PLASMA ACCELERATOR

In phase of radial compression the unsteady plasma flow at the exit of a pulsed plasma accelerators is related to the generation of fast high-energy charged particle beams, to plasma density perturbations, to the internal plasma pressure is opposite to the external magnetic pressure ($B^2/2\mu_0$) associated with plasma column's self-generated magnetic field. The last one listed above is of particular interest. The investigation of the magnetic field of plasma flow relatively gives information about the above mutually close factors cause to plasma flow instability.

In this paper a miniature high-frequency magnetic probe are made for measuring and further investigating the pulsed self-generated magnetic field of plasma flow, in particular, at the exit of the accelerator in an experimental setup of PPA (located in KazNU, IETP). The magnetic probe dimensions are following: coil diameter is 2,12 mm, number of turns is 7, copper wire diameter is 150 μm , and winding length is 1, 1 mm. The coil inductance is about 0,113 μH and the temporal resolution of the magnetic probe is 2,3 ns. The magnetic probe was calibrated using a Hall sensor on the magnetic field of a multi-layered solenoid connected to an alternating power source of 15 A. Thus, the evaluated measurement error of the probe was no more than 10%.

Key words: pulsed plasma accelerator, plasma flow, self-generated magnetic field of plasma flow, magnetic probe.

Ә.Б. Тәжен^{1*}, М.К. Досбалаев²

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

²Эксперименттік және теориялық физика ғылыми-зерттеу институты, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: aigerim_kz271295@mail.ru

Импульстік плазмалық үдеткіштегі плазмалық ағынның өздік магниттік өрісін және жылдамдығын өлшеу

Радиалды сығылу кезеңіндегі плазмалық үдеткіштердің шығысындағы плазмалық ағынның тұрақсыздығы көптеген факторларға байланысты. Олар, өте жылдам, жоғары энергиялы зарядталған бөлшектердің, плазмалық белдіктің өздік магниттік өрісі тудыратын магниттік қысымға қарсы плазманың ішкі қысымының пайда болуы және плазма тығыздығының біртекті тараалмауы. Солардың ішінде плазмалық ағынның өздік магниттік өрісін зерттеу ерекше қызығушылық тудырады, себебі ол жоғарыда аталған өзара байланысқан факторлар туралы салыстырмалы түрде ақпарат бере алады.

Бұл жұмыста ИПУ (ҚазҰУ, ӘТФФЗИ) эксперименттік қондырығыда, атап айтқанда плазмалық үдеткіштің шығысындағы плазмалық ағынның өздік магниттік өрісін өлшеу үшін және зерттеу үшін, жоғары жиілікті, шағын магниттік зонд жасалды. Магниттік зондтың геометриялық өлшемдері келесідей: катушканың диаметрі 2,12 мм, орам саны 7, мыс сымның диаметрі 150 мкм, орамның ұзындығы 1,1 мм. Өлшеуіш катушканың индуктивтілігі 0,113 мкГн, зондтың сезгіштігі 2,3 нс құрайды. Сонымен қатар магниттік зонд шамасы 15 А тен айнымалы ток көзіне қосылған көп қабатты соленоидтың Холл сенсорымен анықталған магниттік өрісіндегі калибрленді. Калибрлеу нәтижесі көрсеткендей, зондтың өлшеу қателігі 10% аспады.

Түйін сөздер: импульстік плазмалық үдеткіш, плазмалық ағын, плазмалық ағынның өздік магнит өрісі, магниттік зонд.

А.Б. Тажен*, М.К. Досбалаев

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы²Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: aigerim_kz271295@mail.ru

Измерение собственного магнитного поля и скорости плазменного потока в импульсном плазменном ускорителе

Нестабильное течение плазменного сгустка на выходе из плазменных ускорителей в стадии радиального сжатия связано со многими факторами: генерацией высокоэнергичных пучков заряженных частиц, возмущением плотности, внутренним давлением плазмы обратного по направлению внешнему давлению собственного магнитного поля плазменного шнура. Особый интерес из них вызывает последнее, исследование собственного магнитного поля плазменного потока, который относительно дает информацию и о вышеуказанных взаимосвязанных между собой факторах.

В этой работе нами был изготовлен высокочастотный магнитный зонд малого размера для измерения и дальнейшего исследования импульсного магнитного поля плазменного потока в экспериментальной установке ИПУ (КазНУ, НИИЭТФ), в частности на выходе из ускорителя. Магнитный зонд имеет следующие геометрические размеры: диаметр катушки – 2,12 мм, число витков – 7, диаметр медного провода – 150 мкм, длина намотки – 1,1 мм. Индуктивность катушки составляет 0,113 мГн, время отклика магнитного зонда равна 2,3 нс. Магнитный зонд был откалиброван с помощью датчика Холла на магнитном поле многослойного соленоида, подключенного к переменному току силой 15 А. Таким образом, погрешность измерения составляет не более 10%.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, плазменный поток, собственное магнитное поле плазменного потока, магнитный зонд.

Introduction

Coaxial plasma accelerators having energy more than 5 J and 1 MJ are widely used in a various types of applications for scientific and applied assignments. For instance, they are used in astrophysics, thermonuclear power engineering, nanotechnology, plasma chemistry, radiography and other fields [1-5].

The operation principle of plasma accelerators is based on the following: a vacuum chamber of accelerators is filled with a working gas at low pressure, usually, it is a D-T gas mixture to generate high-energy neutrons and X-rays [6-8]. During discharging the capacitors connecting to the coaxial electrodes, the current flowing between anode and cathode ionizes gas. Then an ionized gas develops to plasma column and this process can be divided into three stages: 1) gas breakdown and formation of plasma sheath, 2) axial acceleration of plasma shetah, and 3) radial compression of plasma sheath [9]. Detailed description gives below.

When the gas breakdown takes place, thin spark channels are formed between anode and cathode. These channels merge to each other and form a homogeneous plasma sheath [10, 11]. The current density in the plasma sheath is sufficiently high, that can create a strong magnetic field. Due to this, an electrodynamic force $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ appears,

corresponding to Ampere's law. This electrodynamic force has an axial component; consequently, the plasma sheath is accelerated along the axis of the vacuum chamber towards the open end of a pulsed plasma accelerator. Then plasma flow is strongly compressed radially at the exit of the accelerator by its self-generated magnetic field.

In the stages of axial acceleration and radial compression, plasma column becomes more inhomogeneous and unstable due to particles density perturbations in plasma flow related to plasma oscillations and internal plasma pressure is opposite to the magnetic pressure [12]. Plasma instabilities are well investigated theoretically and numerically by MHD model [13, 14], however, there are a few experimental studies. An experimental investigations of plasma flow in a pulsed plasma accelerators and the plasma acceleration dynamics are possible, for this it is necessary to obtain a map of the current density, magnetic field distributions and other especially important plasma parameters (charged particles density, plasma flow energy and energy density, etc.) or to study the accelerated plasma sheath dynamics (speed, acceleration, etc.).

There are various types of methods for plasma flow diagnostics in a pulsed plasma accelerators: laser diagnostics, spectral diagnostics, electric probes, magnetic probes and etc.

Using magnetic probes, it is possible to measure the magnitude of self-generated magnetic field and velocity of plasma flow. Magnetic probes are miniature measuring coils. The operation principle of magnetic probes based on Faraday's law of electromagnetic induction [15-17]. According Faraday's law, the magnetic field, which is measured causes to EMF in the coils of a magnetic probe, which has an area S and a number of turns n . As can be seen from expression (1), the EMF with a magnitude of magnetic field related as follows:

$$\varepsilon = nS \frac{dB}{dt}. \quad (1)$$

Since the EMF is proportional to the derivative of magnetic field, it must be integrated. For this, an integrating electrical circuit (RC) is connected between a probe and an oscilloscope. The capacitance and resistivity of the capacitor and resistor are chosen so that the integration constant $\tau = RC$ is longer than the time of the ongoing process, but so as not to reduce the amplitude value of an input signal. In this case, the expression for an output signal (2) is written as follows:

$$\varepsilon = nS \frac{B}{RC}. \quad (2)$$

A magnetic probe has some privileges; they are short temporal resolution time of the order of several nano and microseconds, sensitivity to high-frequency oscillations, which makes it possible to use them in plasma installations operating in a pulsed mode.

The temporal resolution time of magnetic probes is obtained by the expression (3) [18]:

$$\tau = \frac{L}{R_0}, \quad (3)$$

where L is the coil inductance, it depends on the radius (r) and the number of turns of the coil (n), R_0 is the impedance of a coaxial cable. As can be seen from (3), the temporal resolution time of measurements with a magnetic probe not only depends on the choice of the parameter τ , but also on the coil inductance. When the amount of

number of turns is high and the radius of the coil is large, the inductance of magnetic probes increases, due to which the temporal resolution time of the probe becomes high. Therefore, to manufacture the magnetic probe and to use it in measurements, it is necessary to take into account all the above disadvantages.

Experimental setup

The experimental setup is a coaxial pulsed plasma accelerator with a stored energy on capacitors of about 25 kJ. The vacuum chamber of the accelerator is made of stainless steel, inside the vacuum chamber there is a coaxial system of electrodes. Furthermore, except vacuum chamber and the system of electrodes, the experimental setup includes the following units: a pumping system including fore vacuum and diffusion vacuum pumps, a high-voltage power supply, a battery of storage capacitors, and a vacuum discharger [19-25]. A principle scheme of the experimental setup is shown in Fig. 1.

The total capacity of the capacitor bank is 1440 μF , the operating voltage is in the range of 2-6 kV, and the operating pressure is in the range of 10 mTorr – 1 Torr. Moreover, other types of gases can be injected into the vacuum chamber: argon, hydrogen, etc. For this, there is a special system for gas inlet. In this paper, experiments were performed with a residual air at low pressure.

Magnetic probe design

The inductive coil of the magnetic probe has 7 turns (copper wire is used), which were turned on a glass tube with an outer diameter of 2,12 mm. The measuring coil is placed inside a dielectric tube for electrostatic screening to reduce the influence of electric fields created by charged plasma particles, electrons and ions. The magnetic probe is connected to the LeCroy 354A oscilloscope (500 MHz bandwidth) through a coaxial cable with a characteristic impedance of 50 Ohms, between them there is an integrator. The integration time equal to 5,4 μs . The ends of the measuring coil are covered with a dielectric film to avoid electrical noises.

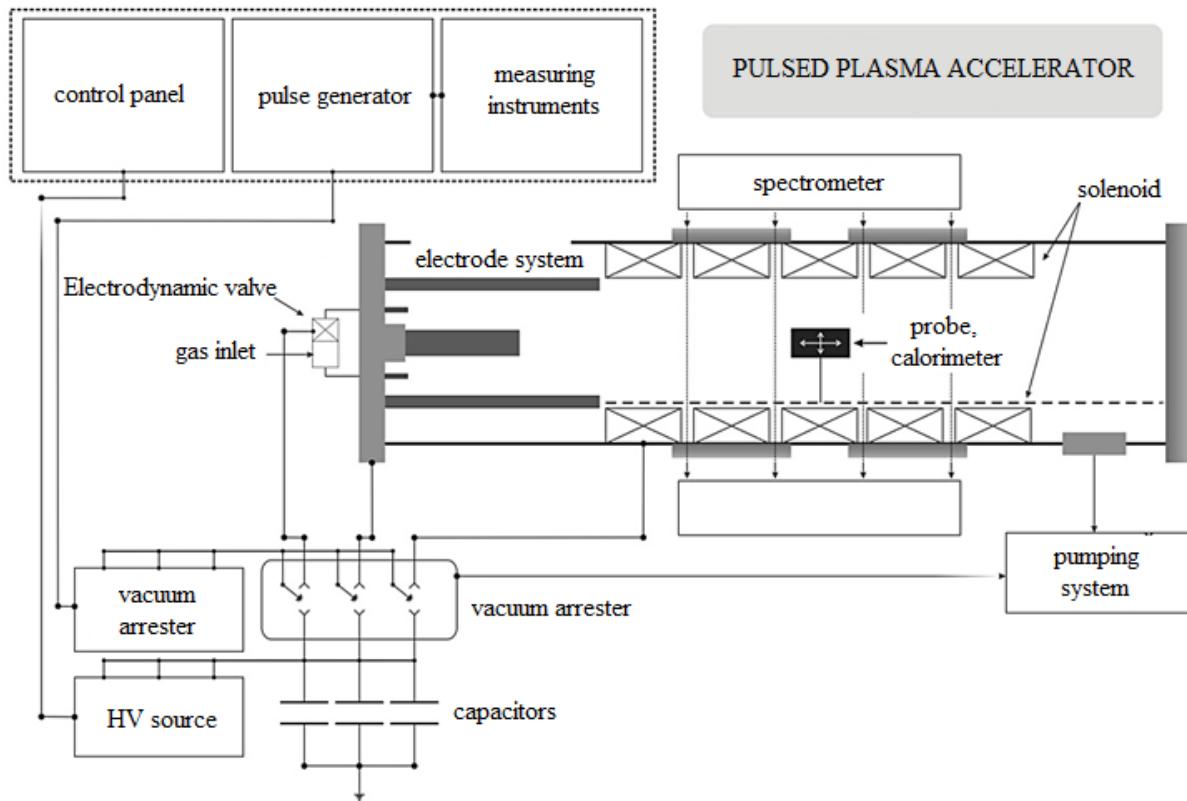


Figure 1 – Principle scheme of an experimental setup of a pulsed plasma accelerator

Magnetic probe calibration

The magnetic probe was calibrated using a multi-layered solenoid. The solenoid was connected to an alternating current source. The current in the solenoid was measured with a clamp meter, which was $I \sim 5\text{-}15 \text{ A}$. An alternating uniform magnetic field is created in the center of the solenoid, where the measurement takes place. The relation between the amplitude value of the EMF at the ends of the probe and the magnetic field of a multi-layered solenoid is expressed as follows (1):

$$\varepsilon_0 = nS\omega B_0 = kB_0 \quad (4)$$

where $\omega = 2\pi\nu$ is the cyclic frequency of the alternating current. To measure B_0 , a 49E852X Hall sensor is used for $\pm 1000 \text{ G}$. The Hall sensor and

magnetic probe both were connected directly to the oscilloscope. The oscillograms of the voltage across the sensor and the magnetic probe obtained experimentally are shown in Fig. 2.

In the technical support of the Hall sensor, a calibration curve is presented, which we used to obtain value of B_0 . As a result, the measured value of the magnetic field in the center of the multi-layered solenoid by the Hall sensor at $I \sim 5\text{A}$ was about $0,1 \text{ T}$. The value of the same field measured with a magnetic probe according to expression (4) was $0,09 \text{ T}$. It follows from this that the measurement error of the magnetic probe is: $\Delta = 0,01$, about 1%. If we take into account the measurement errors of the Hall sensor from the technical support and other devices (including the experimentator), then the measurement error does not exceed 10%.

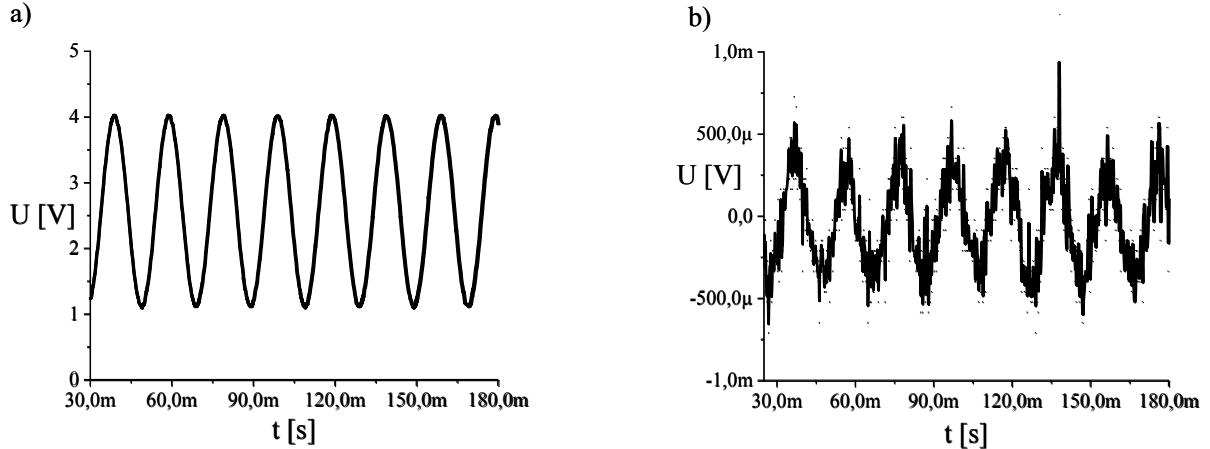


Figure 2 – Output signal that comes out from a) a Hall sensor and b) a magnetic probe

Results and discussions

Measuring the self-generated magnetic field magnitude of plasma flow in the PPA. A magnetic probe is placed near the pulsed plasma accelerator coaxial system of electrodes at a distance of 6 cm. An axis of the measuring coil of a magnetic probe is adjusted vertically to an axis of the cylindrical vacuum chamber, see Fig. 3. Before conducting the experiments, plasma accelerator vacuum chamber was pre-pumped to a pressure of about 10 mTorr. The measurements were carried out under the following conditions: a) at a constant charging voltage of capacitors $U = 3 \text{ kV}$ and at various gas pressures, in our case the residual air pressures are 30-260 mTorr; b) at a constant gas pressure $p = 40 \text{ mTorr}$ and at different charging voltages of capacitors 2-5 kV. In Fig. 3, the typical oscilloscopes of a current waveform of the PPA (solid curve) obtained using a Rogowski coil, a self-generated magnetic field derivative dB/dt curve (dashed line) and a curve of magnetic field magnitude (dot-dotted curve), respectively, obtained using a magnetic probe with and with absence the integrator (integration time constant is $\tau = 5.4 \mu\text{s}$) are presented.

The current waveform of the PPA (see Fig. 3) is a damped sinusoidal signal. At the moment when current would rise, the energy stored on the storage capacitors is transmitted to the coaxial electrodes thereby the residual air filling the interelectrode space is ionized and a plasma sheath is formed. The plasma lifetime was obtained from the current waveform curve, which was of $\sim 300 \mu\text{s}$. Since a magnetic probe is placed at 6 cm distance from the coaxial electrodes, between two output voltage

signals obtained from a Rogowski coil and a magnetic probe, a time shift takes place, as can be seen in Fig. 3 that corresponds the axial acceleration of plasma sheath.

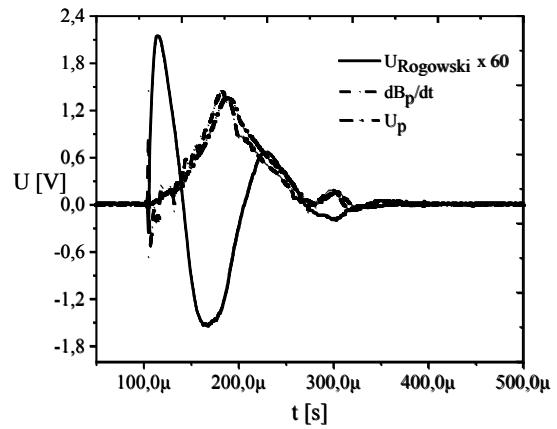


Figure 3 – Typical oscilloscopes obtained at pressure $p = 40 \text{ mTorr}$ and charging voltage $U = 5 \text{ kV}$ from a Rogowski coil, magnetic probe with and with absence integrator

By processing the current waveforms of the PPA, which is obtained at different values of the charging voltages, the current voltage curve of an experimental setup was plotted, see Fig. 4.

As seen from Fig. 4, when the charging voltage of storage capacitors increase the discharge current in the PPA circuit increases linearly, since the plasma has good conductivity, its resistance causes insignificant affect on the total resistance of the PPA circuit, respectively, on the current flowing through this circuit. Moreover rising of current is related with an increase of electrical field in space

between the coaxial electrodes; consequently, due to this a large number of ionization acts of gas take place. The positive ions and electrons appeared after ionization provides the rising of plasma conductivity.

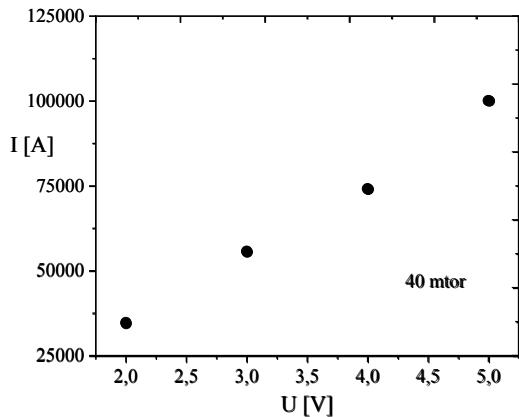


Figure 4 – Current voltage curve of an experimental setup

Using the oscillograms of output signals from a magnetic probe the following what were measured was self-generated magnetic field values of plasma flow at the exit of the coaxial system of electrodes (at a distance $L = 6 \text{ cm}$). Measurements were carried out depending on the gas pressure and charging voltages of capacitors. Results are shown in Fig. 5 and Fig. 6.

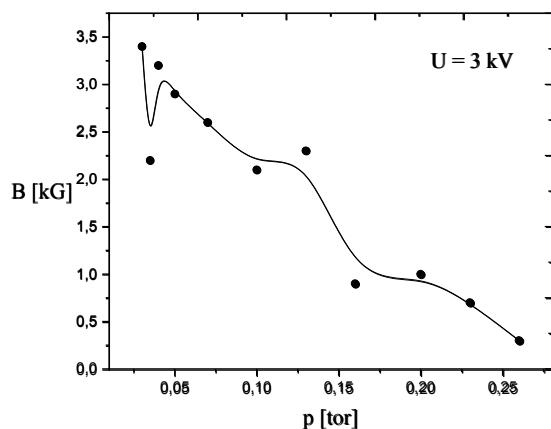


Figure 5 – Dependence of self-generated magnetic field values of plasma flow on the gas pressures

As shown in Fig. 5, dependence self-generated magnetic field value of plasma flow on a gas pressure is nonlinear; notwithstanding, it can be seen from the curve that the value of magnetic field decrease when increase the working gas pressure.

Plasma parameters, including its magnetic field depend on energy putting into the discharge. Energy putting into the discharge sufficient to ionize a gas defines as a function of gas pressure according to Paschen's law, when the voltage and distance between two electrodes not changed. Moreover energy putting into the discharge can be depended on other factors, for example, the charged particles loss as plasma sheath expands and approaches the outer electrode in gas breakdown stage, dissipation of plasma energy and etc.

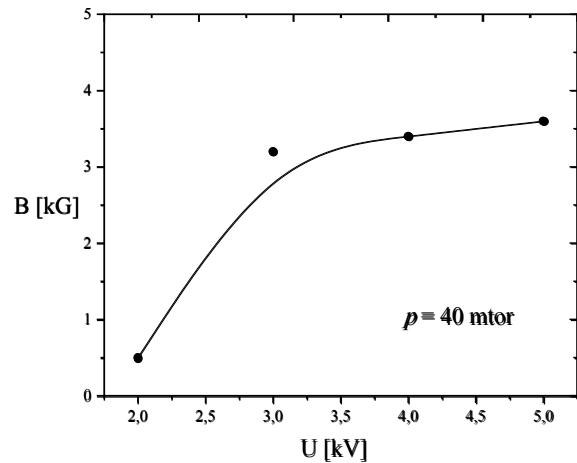


Figure 6 – Dependence of self-generated magnetic field values of plasma flow on the charging voltages of capacitors

It seen from Fig. 6 that when charging voltages of storage capacitors increase, the value of the of self-generated magnetic field of plasma flow also increases, since magnetic field of plasma flow depends on the plasma current density, therefore, when the charging voltage is high, then the strong electrical field appeared between electrodes provide to intensive ionization gas and formation a large number of charges. These charges are the primary carriers of the discharge current in plasma column. However, as seen from Fig. 6 at extremely low charging voltage of storage capacitors $\sim 2 \text{ kV}$, the values of self-generated magnetic field of plasma flow substantially decrease in our experiments. Analyzing this result, it was revealed that the transfer of energy from the capacitors to the electrodes was related with on the operation and conductivity of a vacuum arrester. This of course declines the operation characteristics of an accelerator since transmitted to the electrode the part of the energy is lost for the ignition of the vacuum arrester.

Moreover in this work the processes of the plasma flow breakdown to separate discharges were observed. In the experiment the plasma flow breakdown took place especially at high pressures and low charging voltages, see Fig. 7.

Measuring the plasma flow velocity in the PPA. To measure the plasma flow velocity two same magnetic probes were used. The distance between the probes was 17,5 cm. The measurements were also carried out under two different conditions, as in the previous experiment. One of the examples of

oscillograms obtained from two probes is shown in Fig. 8.

Since the magnetic probes are at a certain distance, then on each of the magnetic probes EMF occurs at different times. EMF first appears on the probe, which is closer to the system of coaxial electrodes, p_1 , and then on the probe p_2 , as seen in Fig. 8. Plasma flow velocities were calculated by measuring the time difference, depending on the gas pressure and the charging voltage of storage capacitors. The results are shown in Fig. 9 and Fig. 10.

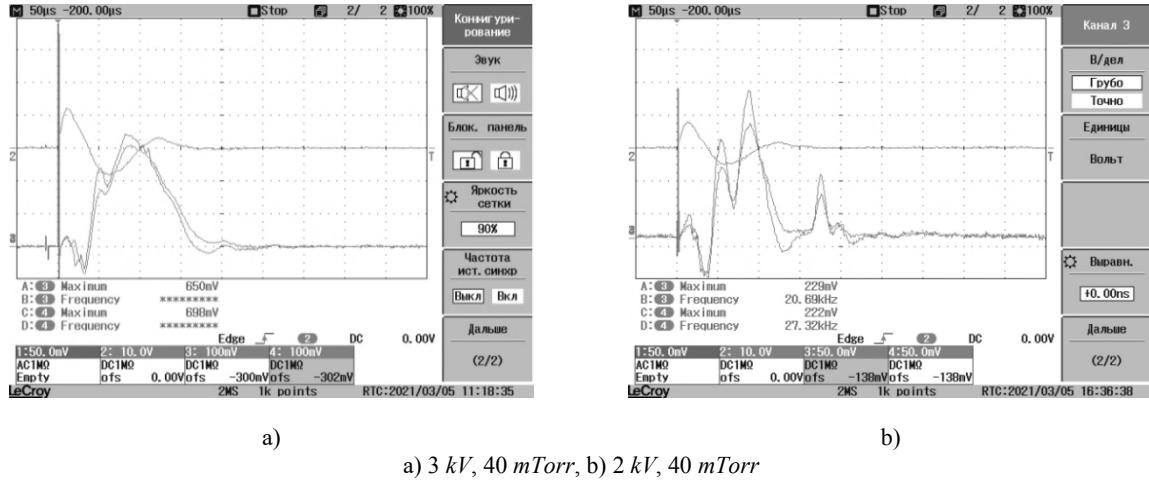


Figure 7 – Pictures of plasma flow breakdown

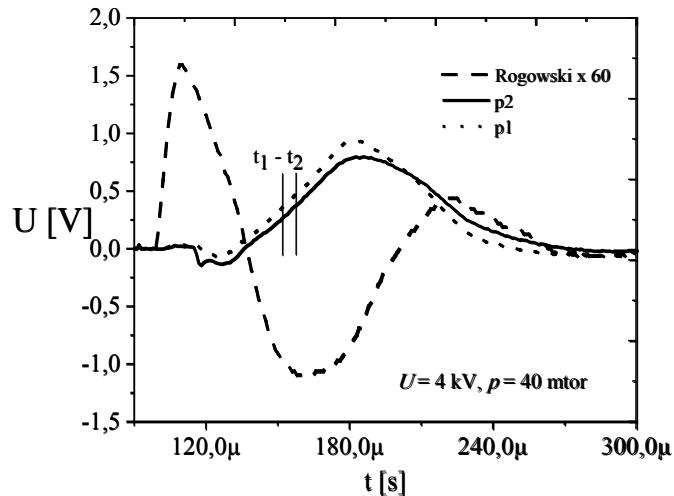


Figure 8 – Output voltage curves of two magnetic probes

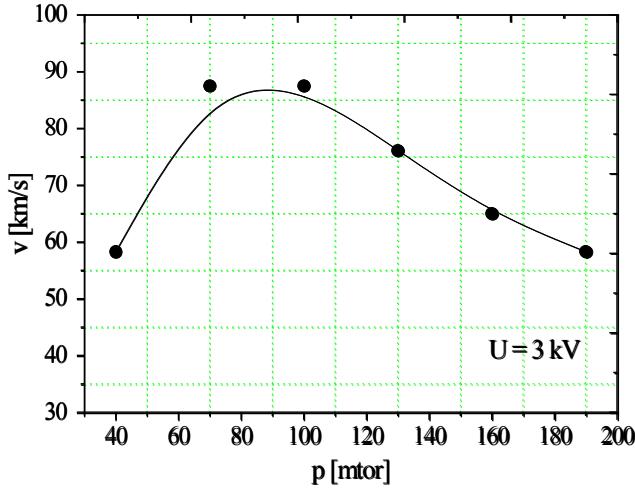


Figure 9 – Dependence of the plasma flow velocity on the gas pressures

According to accelerating force $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, the high plasma current density provides the increasing of plasma flow velocity. Current density depends nonlinearly on the gas pressure corresponding to Paschen's law, as mentioned above; therefore the dependence of the plasma flow velocity on the gas

pressures is also nonlinear. As seen in Fig. 9 there is a point of gas pressure with the maximum value of plasma flow velocity and at this point the pressure will be optimal for a pulsed plasma accelerator with charging voltage of capacitors is 3 kV.

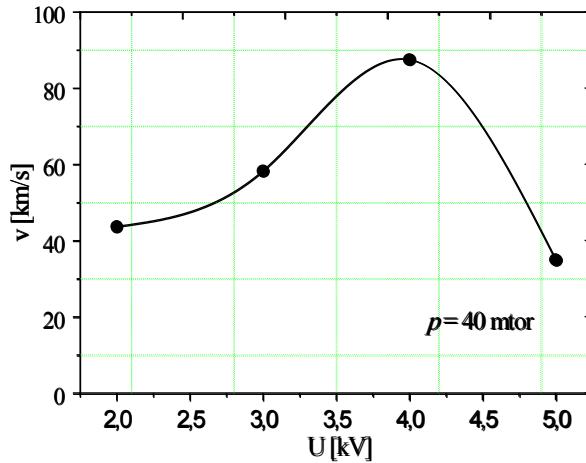


Figure 10 – Dependence of the plasma flow velocity on the charging voltages of capacitors

As seen from Fig. 10, with an increase in the voltage across the storage capacitors, the plasma flow velocity increases, however at high voltages, the velocity decreases instantly. It was an uncontemplated experimental result. According to this we assumed that perhaps it is related with an increase in the mass of plasma sheath, forasmuch as at high charging voltage of capacitors the sufficiently large number of ionization acts takes place and the density of positive ions increases.

The mass of ions heavier than electron mass; therefore, the mass of plasma flow is majority concentrated on positive ions.

Conclusion

In this work, the self-generated magnetic field magnitude and the velocity of plasma flow in a pulsed plasma accelerator were investigated using a magnetic probe. The calibration of a magnetic

probe was carried out in an alternating magnetic field of $\sim 0,1$ T, what was measured by the Hall 49E852X sensor. According to the calibration results, the measurement error of a magnetic probe taking into account the Hall sensor's error was about 10%.

In a vacuum chamber of the PPA magnetic probes were placed at a distance of 6 cm and 23,5 cm of the end of coaxial electrodes, consequently, the distance between two probes was 17,5 cm. At first, depending on the gas pressures and charging voltages of storage capacitors, the values of the self-generated magnetic field of plasma flow were measured. It was found that the values of the self-generated magnetic field of plasma flow gradually decreases with an increase in the gas pressure and increases with an increase the charging voltage of capacitors. In the second case, using two identical magnetic probes, the plasma flow velocities were

measured and its dependence on the gas pressures and the charging voltages of capacitors was obtained. The obtained graphs had complicated characteristic. From these graphs, it follows that with an increasing the charging voltage, the plasma flow velocity increases, however at a large value of charging voltage, in our experiments of 5 kV the velocity decreased. We assume that it perhaps depends on mass of plasma flow. Moreover in the case when the charging voltage of capacitors and the distance between two electrodes are not changed, according to Paschen's law, the plasma flow velocity at a certain gas pressure have a maximum value.

Funding

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (project no. IRN AP09259081).

References

- 1 Yousefi H.R., Thornhill W., Sakai J.I., Nishino Y., Ito H., Masugata K. Dense plasma focus for laboratory astrophysics //Iranian Phys. Journal. – 2009. – Vol.2. – P.17-20.
- 2 Lerner E.J., Murali S.K., Blake A.M., Shannon D.M., Roesse F.J.V. Fusion reaction scaling in a mega-amp dense plasma focus //Nukleonika. – 2012. – Vol.57. – P.205-209.
- 3 Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. Investigation of dust formation in fusion reactors by pulsed plasma accelerator //Laser and Particle Beams. –2017. – Vol.35. – P.741-749.
- 4 Zdunek K., Nowakowska-Langier K., Chodun R., Okrasa S., Rabinski M., Dora J., Domanowski P., Halarowicz J. Impulse Plasma In Surface Engineering – a review //Journal of Phys.: Conference Series. – 2014. – Vol.564. – P.012007.
- 5 Gribkov V.A., Borovitskaya I.V., Demina E.V., Kazilin E.E., Latyshev S.V., Maslyaev S.A., Pimenov V.N., Laas T., Paduch M., Rogozhkin S.V. Application of dense plasma focus devices and lasers in the radiation material sciences for the goals of inertial fusion beyond ignition // Matter and Radiation at Extremes. – 2020. – Vol.5. – P.045403.
- 6 Chung S.R., Behbahani R.A., Xiao C. Charged particles and x-ray emission studies on a dense plasma focus device // Incorporating Plasma Sci. and Plasma Techn. – 2020. – Vol.175, P.1015-1020.
- 7 Jain J., Moreno J., Davis S., Bora B., Pavez C., Avaria G., Soto L. Experimental measurements of high-energy photons in X-rays pulses emitted from a hundred joules plasma focus device and its interpretations // Results in Phys. – 2020. – Vol.16. – P.102915.
- 8 Castillo-Mejía F., Gamboa-de Buen I., Herrera-Velázquezand J.J.E., Rangel-Gutiérrez J. Neutron emission characterisation at the FN-II Dense Plasma Focus // Journal of Phys.: Conference Series. – 2014. – Vol.511. – P.012021.
- 9 Scholz M., Bienkowska B., Ivanova-Stanik I., Karpinski L., Miklaszewski R., Paduch M., Stepniewski W., Tomaszewski K. The physics of a plasma focus // Czechoslovak Journal of Phys. – 2004. – Vol.54. – P.C170-185.
- 10 Kubes P., Paduch M., Cikhhardt J., Cikhardtova B., Klir D., Kravarik J., Rezac K., Zielinska E., Sadowski M.J., Szymaszek A., Tomaszewski K., Zaloga D. Filamentation in the pinched column of the dense plasma focus // Phys. of Plasmas. – 2017. – Vol.24. – P.032706.
- 11 Kubes P., Paduch M., Cikhhardt J., Klir D., Kravarik J., Rezac K., Cikhardtova B., Kortanek J. and Zielinska E. The influence of the nitrogen admixture on the evolution of a deuterium pinch column // Plasma Phys. and Controlled Fusion. – 2016. – Vol.56. – P.045005.
- 12 Liu J.X., Sears J., McMahon M., Tummel K., Cooper C., Higginson D., Shaw B., Povilus A., Link A., Schmidt A. Seeding the $m = 0$ instability in dense plasma focus Z-pinch with a hollow anode // Plasma Phys. – 2016. – P.1-8.
- 13 Narkis J., Hahn E.N., Lowe D.R., Housley D., Conti F., Beg F.N. Magnetohydrodynamic simulations of a megaampere-class Kr-doped deuterium dense plasma focus // Physics of Plasmas. – 2021. – Vol.28. – P.022707.
- 14 Beresnyak A., Giuliani J., Richardson S., Jackson S., Swanekamp S., Schumer J., Commissio R., Mosher D., Weber B. Simulations of a Dense Plasma Focus on a High-Impedance Generator // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2018. – Vol.46. – P.3881 – 3885.
- 15 Saw S.H., Akel M., Lee P.C.K., Ong S.T., Mohamad S.N., Ismail F.D., Nawi N.D., Devi K., Sabri R.M., Baijan A.H., Ali J., Lee S. Magnetic Probe Measurements in INTI Plasma Focus to Determine Dependence of Axial Speed with Pressure in Neon // Journal of Fusion Energy. – 2012. – Vol.31. – P.1-6.

- 16 Piriae D., Javadi S., Mahabadi T.D., Yousefi H.R., Salar Elahi A. and Ghoranneviss M. The influence of the cathode array and the pressure variations on the current sheath dynamics of a small plasma focus device in the presence of an axial magnetic probe // Physics of Plasmas. – 2017. – Vol.24. – P.043504.
- 17 El-Sayed H.A., Allama T.M., Soliman H.M. Plasma Current Sheath Shape and Trapping Efficiency in the 2.2-kJ EAEA-PF1 Plasma Focus Device // Plasma Phys. Reports. – 2019. – Vol.45. – P.821-829.
- 18 Bhuyan H., et al. Magnetic probe measurements of current sheet dynamics in a coaxial plasma accelerator // Meas. Sci. Technol. – 2003. – Vol.14. – P.1769-1776.
- 19 Dosbolayev M., Raiymkhanov Zh., Tazhen A., Ramazanov T. Experimental Investigation of the Properties of Plasma-Dust Formations on Pulsed Plasma Accelerator // IEEE Transaction on plasma sci. – 2019. – Vol.47. – P.3047-3051.
- 20 Tazhen A.B., Dosbolayev M.K., Raiymkhanov Zh., Ramazanov T.S. Generation and Diagnostics of Pulse Plasma Flows // Plasma Phys. Reports. – 2020. – Vol.46. – P. 465-471.
- 21 Dosbolayev M.K., Raiymkhanov Zh., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. Impulse Plasma Deposition of Carbon Nanoparticles // Acta Physica Polonica A. – 2019. – Vol.136. –P.348-350.
- 22 Tazhen A.B., Nurbolat K., Dosbolayev M.K. Spectroscopic diagnostic of a pulsed plasma flow // Journal of Peos. – 2018. – Vol.20. – P.45-51.
- 23 Utegenov A.U., Tazhen A.B., Rayimkhanov Zh.R., Kambarov A.A. Heat erosion of the graphite target under effects of intensive pulse plasma flow // Recent Contributions to Physics. – 2018. – Vol.4. P. – 34-40.
- 24 Tazhen A.B., Rayimkhanov Zh.R., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Obtaining and diagnostics of pulse plasma flows // Uspekhi prikladnoi fiziki. – 2019. – Vol.5. – P.463-471.
- 25 Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Tazhen A.B., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T. Dynamic properties of pulse plasma flow and dust formation in the pulsed plasma accelerator // News Nat. Acad. Sci. Republic Kazakhstan. – 2016. – Vol.310. – P. 48-87.

References

- 1 H.R. Yousefi, W. Thornhill, J.I. Sakai, Y. Nishino, H. Ito, K. Masugata. Iranian Phys. Journal 2, 17-20 (2009).
- 2 E.J. Lerner, S.K. Murali, A.M. Blake, D.M. Shannon, F.J.V. Roesse. Nukleonika 57, 205-209 (2012).
- 3 M.K. Dosbolayev, A.U. Utegenov, A.B. Tazhen, and T.S. Laser and Particle Beams 35, 741-749 (2017). .
- 4 K. Zdunek, K. Nowakowska-Langier, R. Chodun, S. Okrasa, M. Rabinski, J. Dora, P. Domanowski, J. Halarowicz. Journal of Phys.: Conference Series 564, 012007 (2014).
- 5 V.A. Gribkov, I.V. Borovitskaya, E.V. Demina, E.E. Kazilin, S.V. Latyshev, S.A. Maslyaev, V.N. Pimenov, T. Laas, M. Paduch, S.V. Rogozhkin. Matter and Radiation at Extremes 5, 045403 (2020).
- 6 S.R. Chung, R.A. Behbahani, C. Xiao. Incorporating Plasma Sci. and Plasma Techn. 175, 1015-1020 (2020).
- 7 J. Jain, J. Moreno, S. Davis, B. Bora, C. Pavez, G. Avaria, L. Soto. Results in Phys. 16, 102915 (2020).
- 8 F. Castillo-Mejía, I. Gamboa-de Buen, J.J.E. Herrera-Velázquezand, J. Rangel-Gutiérrez. Journal of Phys.: Conference Series 511, 012021 (2014).
- 9 M. Scholz, B. Bienkowska, I. Ivanova-Stanik, L. Karpinski, R. Miklaszewski, M. Paduch, W. Stepniewski, K. Tomaszewski. Czechoslovak Journal of Phys. 54, C170-185 (2004).
- 10 P. Kubes, M. Paduch, J. Cikhhardt, B. Cikhardtova, D. Klir, J. Kravarik, K. Rezac, E. Zielinska, M.J. Sadowski, A. Szymaszek, K. Tomaszewski, D. Zaloga. Phys. of Plasmas 24, 032706 (2017).
- 11 P. Kubes, M. Paduch, J. Cikhhardt, D. Klir, J. Kravarik, K. Rezac, B. Cikhardtova, J. Kortanek and E. Zielinska. Plasma Phys. and Controlled Fusion 58, 045005 (2016).
- 12 J.X. Liu, J. Sears, M. McMahon, K. Tummel, C. Cooper, D. Higginson, B. Shaw, A. Povilus, A. Link, A. Schmidt. Plasma Phys. 1-8 (2016).
- 13 J. Narkis, E.N. Hahn, D.R. Lowe, D. Housley, F. Conti, F.N. Beg. Physics of Plasmas 28, 022707 (2021).
- 14 A. Beresnyak, J. Giuliani, S. Richardson, S. Jackson, S. Swanekamp, J. Schumer, R. Commissio, D. Mosher, B. Weber. IEEE Transactions on Plasma Science 46, 3881 – 3885 (2018).
- 15 S.H. Saw, M. Akel, P.C.K. Lee, S.T. Ong, S.N. Mohamad, F.D. Ismail, N.D. Nawi, K. Devi, R.M. Sabri, A.H. Baijan, J. Ali, S. Lee. Journal of Fusion Energy 31, 1-6 (2012).
- 16 D. Piriae, S. Javadi, T.D. Mahabadi, H.R. Yousefi, A. Salar Elahi, and M. Ghoranneviss. Physics of Plasmas 24, 043504 (2017).
- 17 H.A. El-Sayed, T.M. Allama, H.M. Soliman. Plasma Phys. Reports 45, 821-829 (2019).
- 18 H. Bhuyan et al. Meas. Sci. Technol. 14, 1769-1776 (2003).
- 19 M. Dosbolayev, Zh. Raiymkhanov, A. Tazhen, T. Ramazanov. IEEE Transaction on plasma sci. 47, 3047-3051 (2019).
- 20 A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, Zh. Raiymkhanov, T.S. Ramazanov. Plasma Phys. Reports 46, 465-471 (2020).
- 21 M.K. Dosbolayev, Zh. Raiymkhanov, A.B. Tazhen, T.S. Ramazanov. Acta Physica Polonica A 136, 348-350 (2019).
- 22 A.B. Tazhen, K. Nurbolat, M.K. Dosbolayev. Journal of Peos 20, 45-51 (2018).
- 23 A.U. Utegenov, A.B. Tazhen, Zh.R. Rayimkhanov, A.A. Kambarov, Recent Contributions to Physics, 4, 34-40 (2018).
- 24 A.B. Tazhen, Zh.R. Rayimkhanov, M.K. Dosbolayev, Ramazanov T.S. Uspekhi prikladnoi fiziki 5, 463-471 (2019).
- 25 M.K. Dosbolayev, A.U. Utegenov, A.B. Tazhen, T.S. Ramazanov, M.T. Gabdullin News Nat. Acad. Sci. Republic Kazakhstan 310, 48-87 (2016).

Р.Е. Жумадилов^{1*}  , **А.У. Утегенов¹**  ,
С.А. Оразбаев¹  , **Д.Г. Батрышев²** 

¹Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы

²Атырауский университет имени Халела Досмухамедова, Казахстан, г. Атырау

*e-mail: rakimzhan@gmail.com

ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ИМПУЛЬСНО МОДУЛИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕ ВЧ РАЗРЯДА

Углеродные наночастицы синтезировались с использованием плазмы ВЧ разряда 13,56 МГц в импульсном режиме для управления размерами наночастиц. Смесь газов Ar/CH₄ вводилась в плазменную среду с емкостной связью, основной частью которой являются параллельно расположенные высокочастотный и заземленный электроды. Эксперименты по синтезу проводились при комнатной температуре и следующих условиях: давление в рабочей камере – 0,99 Торр; концентрация смеси газов Ar (96%) + CH₄ (4%); длительность синтеза – 5 секунд; при мощности разряда – 10 Вт. Частота импульса плазмы ВЧ разряда при модулировании варьировалась от 10 Гц до 10 кГц, также коэффициент заполнения составлял 50% для каждого проведенного эксперимента. Экспериментальные наблюдения показали, что размер наночастиц углерода возрастает с увеличением частоты импульсного сигнала. Также было выявлено, что с помощью частоты модулированного импульсного ВЧ сигнала появляется возможность контролировать размер углеродных наночастиц в диапазоне 40-70 нм. Синтезированные наночастицы собирались непосредственно на медной сетке для ПЭМ анализа, которая помещалась на поверхность нижнего электрода. Анализ ПЭМ изображений показали два вида наночастиц, один из которых представляет собой агломерат наночастиц с аморфной структурой, а другие – нанометрового размера с кристаллическими структурами.

Ключевые слова: углеродные наночастицы, ВЧ разряд, импульсная ВЧ плазма.

R.Ye. Zhumadilov^{1*}, A.U. Utegenov¹, S.A. Orazbayev¹, D.G. Batryshev²

¹Kazakh-British Technical University, Kazakhstan, Almaty

²Atyrau University named after Khalel Dosmukhamedov, Kazakhstan, Atyrau

*e-mail: rakimzhan@gmail.com

Obtaining of carbon nanoparticles in pulsed modulated RF discharge plasma

Carbon nanoparticles were synthesized using a 13.56 MHz RF discharge plasma in pulsed mode to control the size of the nanoparticles. An Ar/CH₄ gas mixture was injected into the chamber to create capacitive coupled plasma medium, the main part of which is an electrode connected to the RF generator and a grounded electrode arranged in parallel. The synthesis experiments were carried out at room temperature and under the following conditions: pressure in the working chamber 0.99 Torr; concentration of Ar(96%) + CH₄(4%) gas mixture; synthesis time 5 seconds; at discharge power 10 W. The frequency of the RF discharge plasma pulse during modulation was varied from 10 Hz to 10 kHz, also the duty-cycle was 50% for each performed experiment. Experimental observations have revealed that the size of carbon nanoparticles increases with the frequency of the pulse signal. It has also been determined that by using a frequency of the modulated pulsed RF signal it is possible to control the size of carbon nanoparticles in the range of 40-70 nm. The synthesized nanoparticles were collected directly on a copper mesh for TEM microscopy, which was placed on the surface of the bottom electrode. TEM image analysis showed two types of nanoparticles, some of which are an agglomerate of nanoparticles with an amorphous structure, while the others are nanometer-sized with crystalline structures.

Key words: carbon nanoparticicles, RF discharge, pulsed RF plasma.

Р.Е. Жұмадилов^{1*}, А.У. Әтегенов¹, С.А. Оразбаев¹, Д.Г. Батрышев²

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

²Халел Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Қазақстан, Атырау қ.

*e-mail: rakimzhan@gmail.com

Көміртегі нанобөлшектерін импульсті модуляцияланған ЖЖ плазмада алу

Көміртегі нанобөлшектері жоғары жиілікті (ЖЖ) плазмада импульсті режимді қолдану арқылы, яғни нанобөлшектердің өлшемдерін басқару арқылы синтезделді. Ar/CH₄ газдарының қоспасы сыйымдылықты байланысы бар плазмалық ортаға енгізілді, оның негізгі бөлігі параллель орналасқан жоғары жиілікті және жерге қосылған электродтар. Синтез бойынша эксперименттер бөлме температурасында және келесі жағдайларда жүргізілді: жұмыс камераасындағы қысым 0,99 Торр; газ қоспасының концентрациясы Ar (96 %) + CH₄ (4 %); синтез ұзақтығы 5 секунд; разряд қуаты 10 Вт. Модуляция кезінде ЖЖ разряд плазмасының импульс жиілігі 10 Гц-тен 10 кГц-ке дейін өзгерді, сонымен қатар әр эксперимент үшін толтыру коэффициенті 50 % болды. Эксперименттік бақылаулар импульстік сигнал жиілігінің жоғарылауы көміртегі нанобөлшектерінің мөлшері артатындығын көрсетті. Соңдай-ақ, модуляцияланған импульсті ЖЖ сигналының жиілігімен 40–70 нм диапазонындағы көміртекті нанобөлшектердің мөлшерін басқару мүмкіндігі пайда болатындығы анықталды. Синтезделген нанобөлшектер төменгі электродтың бетіне орналастырылған тікелей мыс торға жиналды. ТЭМ кескіндерін талдау нанобөлшектердің екі түрін көрсетті, олардың бірі аморфты құрылымы бар нанобөлшектердің агломераты, ал басқалары кристалды құрылымы бар нанометр өлшемді нанобөлшектер.

Түйін сөздер: көміртегі нанобөлшектері, ЖЖ разряд, импульсті ЖЖ плазма.

Введение

Среди всех углеродных наноматериалов, углеродные наночастицы (УНЧ) оказались наиболее исследуемыми материалами. Так как УНЧ вызывают значительный интерес в последние годы благодаря их хорошей люминесценции, высокой химической стабильности, проводимости и широкополосному оптическому поглощению [1-3]. В настоящее время приложение УНЧ очень обширно, например, в основном применяются в химическом анализе [4], оптоэлектронных устройствах [5,6], разработке катализаторов [7–9], а также при разработке супергидрофобных поверхностей [10,11] и др. Свойства углеродных наночастиц в значительной степени зависит от диаметра, их концентрации, формы, распределения по размеру.

Плазма является эффективным инструментом для синтеза углеродных наноматериалов, включая алмазы, наночастицы, фуллерены, нанотрубки, нанопленки и графены. В последние годы импульсные плазменные разряды представляют значительный интерес для обработки материалов из-за их больших преимуществ. Данный метод широко используется для решения различных технологических задач, в том числе для плазменного травления микроструктур, для напыления тонких функциональных покрытий, для производстваnano- и микрочастиц и т.д. Синтез nano- и микрочастиц можно осуществить при различных типах низкотемпературной плазмы и

при различных составах газов, в таких как, силан [12-14], углеводороды [15-20], фтороуглероды [21,22] и т.д. Также методом импульсного разряда есть возможность контролировать процесс формирования наночастиц в плазме, регулируя частоту модулированного сигнала и коэффициент заполнения в дополнение к другим параметрам, таким как давление и мощность разряда. Это важно для фундаментального понимания процесса роста наночастиц при различных параметрах импульсного разряда.

Влияние модулированного сигнала на формирование наночастиц ранее рассматривались в нескольких исследованиях [23,24]. Verdeyen и др. показали, что количество пылеобразования в плазме SiH₄ с импульсной модуляцией намного меньше, чем в плазме непрерывного действия [25]. Lloret и др. использовал модулированный высокочастотный разряд для осаждения тонких пленок аморфного кремния и обнаружил, что частота модуляции оказывает сильное влияние на пористость и шероховатость пленок, и объяснил это эффектами модуляции на формирование наночастиц в плазме [26]. В высокочастотной модулированной плазме Howling и др. показали, что плотности отрицательных ионов значительно снижаются для частот модуляции около 1 кГц [27].

При импульсных разрядах плазма периодически «включается» на короткое время (t_{on}), а затем «выключается» на определенное время (t_{off}). Авторы работы [28] показали, что во время t_{off}

могут происходить обычные процессы полимеризации из частиц, образующихся во время t_{on} . В этом случае могут быть синтезированы шероховатые пленки, образованные из наночастиц.

Целью данной работы было исследование влияние импульсно модулированного ВЧ разряда на формирование и роста углеродных наночастиц в смеси газов аргон-метан, при постоянной мощности и времени синтеза.

Экспериментальная часть

Исследования проводились на экспериментальной установке, работающей на основе ВЧ емкостного разряда. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1. Плазма зажигалася между двумя параллельными электродами из нержавеющей стали с диаметрами 100 мм и расстоянием 30 мм. Кроме того, следует отметить, что верхний электрод был подключен к ВЧ генератору, а нижний электрод был заземлен. ВЧ мощность с частотой 13,56 МГц генерировалась генератором ВЧ сигналов Seren-R301. Этот сигнал модулировался импульсами с помощью функции модуляции сигнала данного генератора. Эксперименты проводились при давлении газа 0,99 Торр. Мощность разряда и время синтеза оставались постоянными, 10 Вт и 5 сек (100 циклов), соответственно. Частота импульсного сигнала варьировалась от 1 Гц до 10 кГц, в то время как коэффициент заполнения импульсного сигнала был фиксированным, 50%. Перед каждым экспериментом камера откачивалась до высокого вакуума 10^{-5} Торр. В качестве подложки использовались кремний, стекло и сетки для ПЭМ. Подробное описание экспериментальной установки описано в работе [29].

В данной работе синтезированные углеродные наночастицы осаждались на кремниевые подложки, которые очищались этианолом и сушились чистым инертным газом. В качестве источника углерода использовали метан (CH_4), который подавали в камеру как смесь газов аргон и метан с концентрацией $\text{Ar}(96\%)+\text{CH}_4(4\%)$ с фиксированной скоростью 15 sccm. Контроль потока газа осуществляется расходомером MFC Bronkhorst. Все эксперименты проводились при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Углеродные наночастицы были анализированы с помощью сканирующего электронного

микроскопа СЭМ (Crossbeam 540). Были получены несколько микрофотографий с разными кратностями увеличения в нескольких местах подложки. На каждом СЭМ изображении были определены размеры наночастиц и были построены графики распределения по размерам. На рисунке 2 представлены СЭМ изображение и график распределения по размерам углеродных наночастиц синтезированных при различных частотах импульсного ВЧ разряда: 2а – 100 Гц, 2б – 1 кГц, 2в – 10 кГц и 2г – без модуляции. В результате анализа распределения частиц по размерам были получены следующие данные: $42 \pm 0,5$ нм при частоте модуляции 100 Гц; при 1 кГц – $52 \pm 2,5$ нм; при 10 кГц – $61 \pm 7,7$ нм; и без модуляции – 67 ± 8 нм.

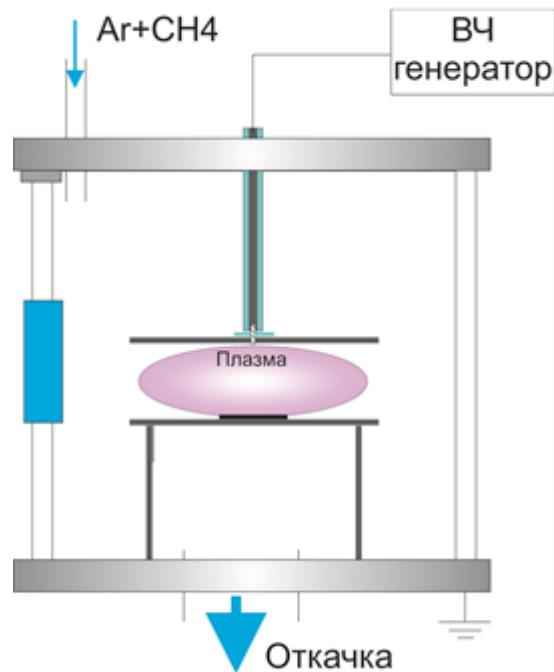
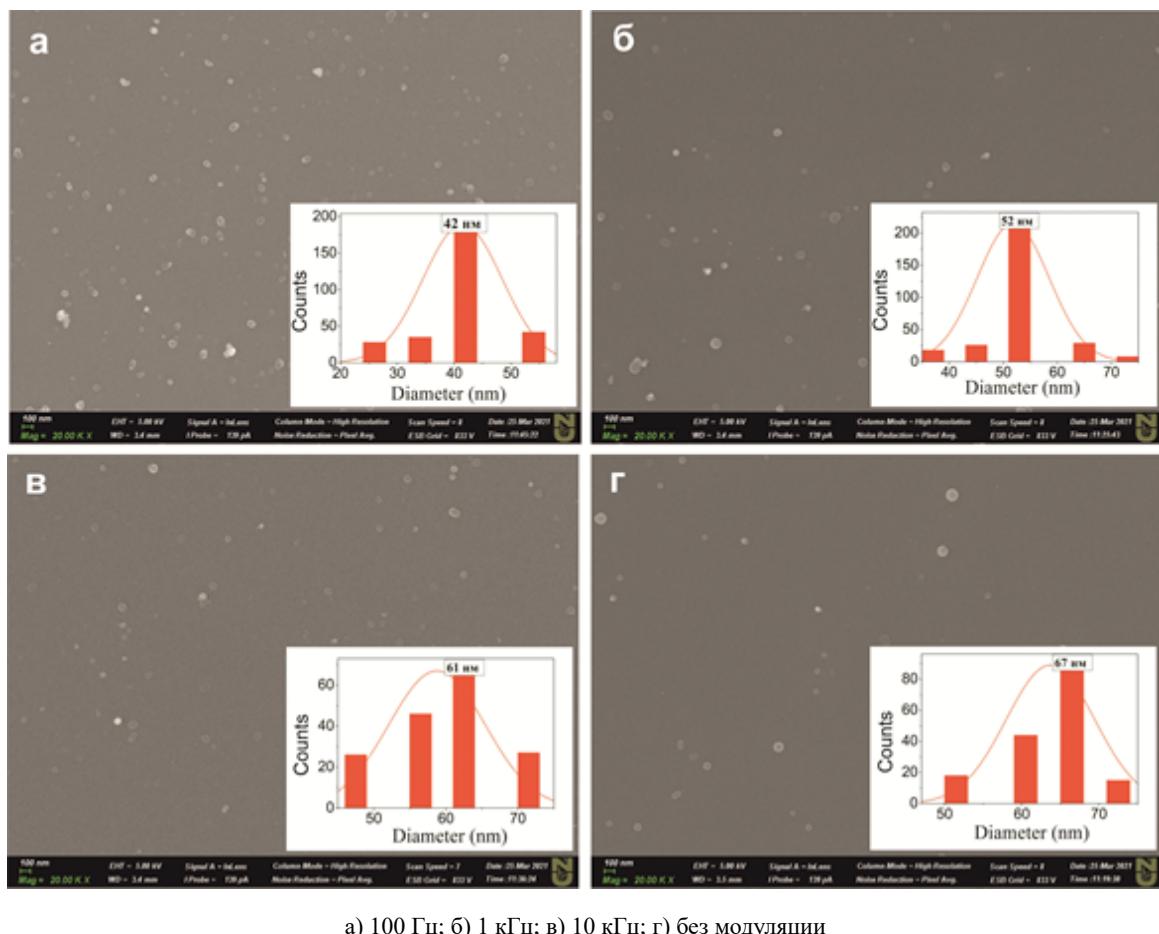


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки ВЧ емкостного разряда.

Динамика нуклеации наночастиц в этом типе разряда недавно была изучена с помощью моделирования [30]. При импульсных разрядах время «включения» (t_{on}) и время «выключения» (t_{off}) плазмы зависит от коэффициента заполнения и частоты модулированного сигнала f . Частота определяется по следующей формуле:

$$f = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \quad (1)$$



а) 100 Гц; б) 1 кГц; в) 10 кГц; г) без модуляции

Рисунок 2 – СЭМ изображение и распределение углеродных наночастиц по размерам, синтезированных при различных значениях частоты модуляции

Было обнаружено, что с увеличением частоты модулированного сигнала, увеличивается диаметр синтезируемых наночастиц. Это объясняется тем, что низкие частоты модуляции приводят к замедлению частиц плазмы и, следовательно, к их локальному накоплению. Этот результат объясняется обратным влиянием различных частот модуляции на значения плотности, когда наблюдается увеличение плотности частиц плазмы при уменьшении частоты модуляции [31]. Более того, можно предположить, что увеличение частоты модуляции влияет на рост концентрации радикалов, которые являются основными составляющими синтезируемых наночастиц. Однако, примечательно то, что концентрация радикалов углерода уменьшается во время t_{off} . Это связано с тем, что, радикалы эффективно теряются на стенках реактора при отключенном состоянии плазмы [30].

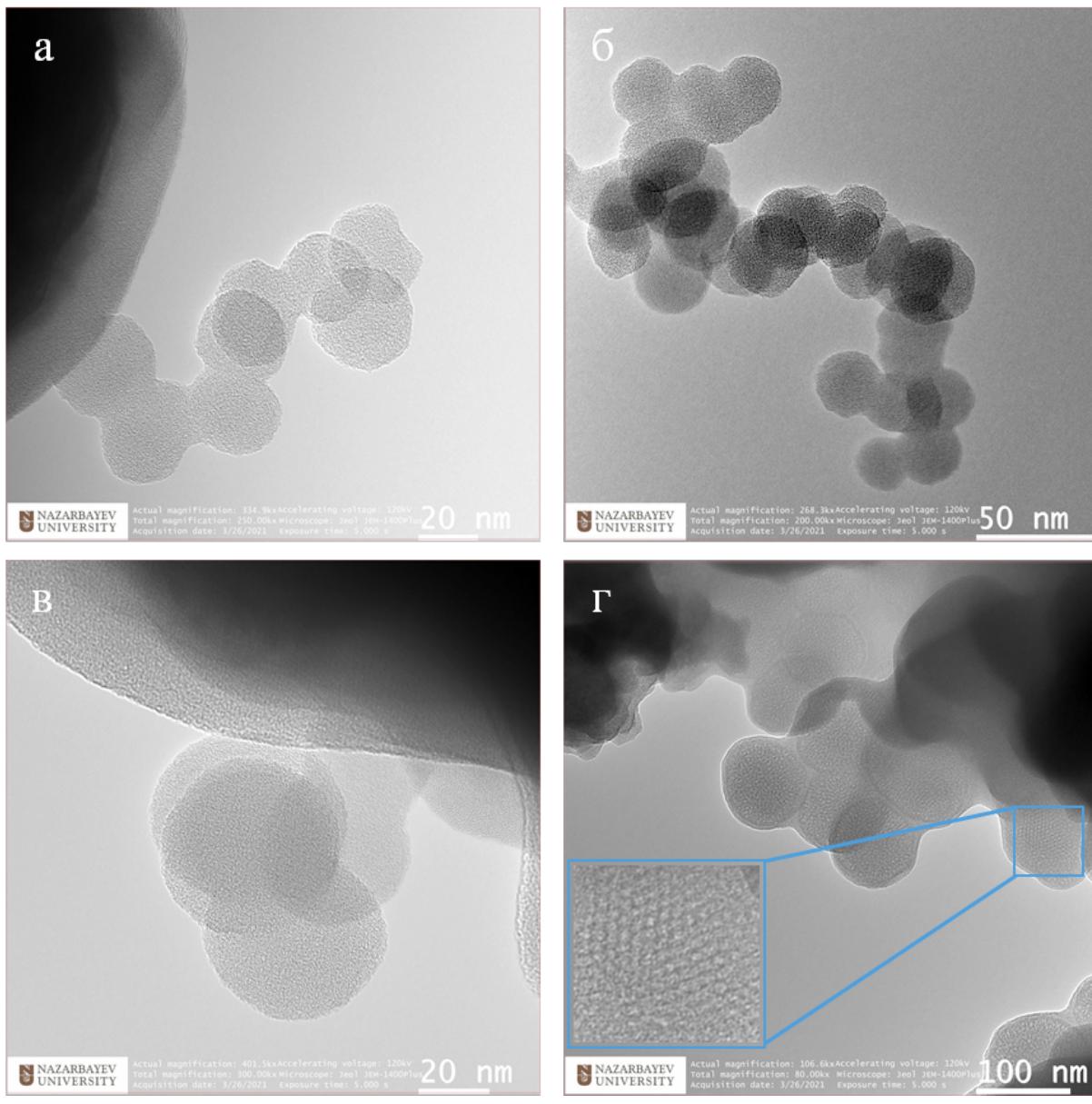
Для ПЭМ анализа углеродные наночастицы были синтезированы на специальные медные

сетки. На рисунке 3 представлены ПЭМ изображения углеродных наночастиц синтезированные при различных частотах импульсного ВЧ разряда: рисунок 3а соответствует 100 Гц; 3б – 1 кГц; 3в – 10 кГц; 3г – синтезу без модуляции.

Из рисунка 3 видно, что частицы агломерированы друг с другом, но форма каждой частицы сферическая. Известно, что частицы в плазме заряжаются отрицательно из-за большой энергии электронов в плазме. Отрицательно заряженные частицы обладают электростатическим отталкиванием, и агломерации частиц может не произойти. Однако заряд на частицах вблизи электродов может оторваться от поверхности частицы, тем самым меняя заряд частиц в положительную сторону, то есть приводит к флукутуации заряда. Вследствие этого частицы могут агломерировать друг с другом [32]. Углеродные наночастицы, которые были синтезированы без модулированного сигнала, что показали кристаллическую структуру, по-

казанную на изображении ПЭМ как вставка с высоким разрешением (рисунок 3г). Авторы работы [24] выявили, что заряженные частицы могут влиять на кристаллическую структуру

частиц. Поскольку большие частицы состоят из более мелких частиц, это указывает на то, что большая частица является агломератом мелких частиц.



а) 100 Гц; б) 1 кГц; в) 10 кГц; г) без модуляции

Рисунок 3 – ПЭМ изображения углеродных наночастиц, синтезированных при различных частотах модуляции

Заключение

Эксперименты, проведенные в импульсном разряде аргон-метан, показывают, что частота модулированного импульсного сигнала сущес-

твенно влияет на рост и формирования углеродных наночастиц. Посредством импульсного ВЧ сигнала с частотами 100 Гц до 10 кГц появляется возможность контроля размеров углеродных частиц в диапазоне 40-70 нм. По результатам

экспериментальных работ и анализа СЭМ и ПЭМ микроскопий было выявлено, что модулированный ВЧ сигнал, в основном, влияют на процесс формирования и роста наночастиц. Так как основными составляющими синтезируемых углеродных наночастиц являются радикалы углеводорода, данный эффект, в конечном итоге, влияет на концентрацию радикалов углерода, которая возрастает с увеличением частоты. Та-

ким образом, их численность увеличивается во время импульса и остается неизменной во время отсутствия импульса.

Благодарности

Работа была выполнена в рамках гранта АР08957305 Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Литература

- 1 Reckmeier C.J., Schneider J., Susha A.S., Rogach A.L. Luminescent colloidal carbon dots: Optical properties and effects of doping // Opt. Express – 2016. – Vol. 24. – P.A312–A340.
- 2 Goryacheva I.Y., Sapelkin A.V., Sukhorukov G.B. Carbon nanodots: Mechanisms of photoluminescence and principles of application // Trends Anal. Chem. – 2017. – Vol. 90. – P.27–37.
- 3 Kokorina A.A., Prikhozhdenko E.S., Sukhorukov G.B., Sapelkin A.V., Goryacheva I.Y. Luminescent carbon nanoparticles: Synthesis, methods of investigation, applications // Russ. Chem. Rev. – 2017. – Vol. 86. – P. 1157–1171.
- 4 Liu H., Ding J., Zhang K., Ding L. Construction of biomass carbon dots based fluorescence sensors and their applications in chemical and biological analysis // TrAC Trends Anal. Chem. – 2019. – Vol. 118. – P. 315–337.
- 5 Lim S.Y., Shen, W., Gao Z. Carbon quantum dots and their applications // Chem. Soc. Rev. – 2015. – Vol. 44. – P. 362–381.
- 6 Yuan F., Li S., Fan Z., Meng X., Fan L., Yang S. Shining carbon dots: Synthesis and biomedical and optoelectronic applications // Nano Today – 2016. – Vol.11. – P. 565–586.
- 7 Zhu C., Liu C., Zhou Y., Fu Y., Guo S., Li H., Zhao S., Huang H., Liu Y., Kang Z. Carbon dots enhance the stability of CdS for visible-light-driven overall water splitting // Appl. Catal. B Environ. – 2017. – Vol.216. – P.114–121.
- 8 Wu X., Zhu C., Wang L., Guo S., Zhang Y., Li H., Huang H., Liu Y., Tang J., Kang Z. Control strategy on two-/four-electron pathway of water splitting by multidoped carbon based catalysts // ACS Catal. – 2017. – Vol.7. – P. 1637–1645.
- 9 Zhu C., Liu C., Fu Y., Gao J., Huang H., Liu Y., Kang Z. Construction of CDs/CdS photocatalysts for stable and efficient hydrogen production in water and seawater // Appl. Catal. B Environ. – 2019. – Vol.242. – P. 178–185.
- 10 Orazbayev S., Zhumadilov R., Zhunisbekov A., Gabdullin M., Yerlanuly Y., Utegenov A., Ramazanov, T. Superhydrophobic carbonous surfaces production by PECVD methods // Applied Surface Science – 2020. – Vol.515. – P. 146050.
- 11 Orazbayev S., Gabdullin M., Ramazanov T., Dosbolayev M., Omirbekov D., Yerlanuly Y. Obtaining of superhydrophobic surface in RF capacitively coupled discharge in Ar/CH4 medium // Applied Surface Science. – 2019. – Vol.472. – P. 127–134.
- 12 Bouchoule A. Dusty Plasmas: Physics, Chemistry and Technological Impacts in Plasma Processing // Wiley & Sons. – 1999. – P. 418.
- 13 Hollenstein C., Dorier J.L., Dutta J., Sansonnens L., Howling A. A. Diagnostics of particle genesis and growth in RF silane plasmas by ion mass spectrometry and light scattering // Plasma Sources Sci. Technol. – 1994. – Vol.3. – P. 278.
- 14 Qin Y., Bilik N., Kortshagen U.R., Aydin E.S. Laser light scattering from silicon particles generated in an argon diluted silane plasma // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2016. – Vol. 49. – P.085203.
- 15 Hong S., Berndt J., Winter J. Growth precursors and dynamics of dust particle formation in the Ar/CH4 and Ar/C2H2 plasmas // Plasma Sources Sci. Technol. – 2003. – Vol.12. – P. 46.
- 16 Kovacevic E., Berndt J., Strunskus T., Boufendi L. Size dependent characteristics of plasma synthesized carbonaceous nanoparticles // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol.112. – P.013303.
- 17 Berndt J., Acid H., Kovacevic E., Cachoncinlle C., Strunskus T., Boufendi L. Deposition and tuning of nanostructured hydrocarbon deposits: From superhydrophobic to superhydrophilic and back // J. Appl. Phys. – 2013. – Vol. 113. – P. 063302.
- 18 Berndt J., Kovacevic E., Stefanovic I., and Boufendi L. Controlled dust formation in pulsed rf plasmas // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 106. – P. 063309.
- 19 Van de Wetering F.M. J.H., Beckers J., Kroesen G.M.W. Anion dynamics in the first 10 milliseconds of an argon–acetylene radio-frequency plasma // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2012. – Vol. 45. – P. 485205.
- 20 Greiner F., Carstensen J., Kohler N., Pilch I., Ketelsen H., Knist S., Piel A. Imaging Mie ellipsometry: dynamics of nano-dust clouds in an argon–acetylene plasma // Plasma Sources Sci. Technol. – 2012. – Vol. 21. – P. 065005.
- 21 Anderson H.M., Radovanov S., Mock J.L., Resnick P.J. Particles in C2F6-CHF3 and CF4-CHF3 etching plasmas // Plasma Sources Sci. Technol. – 1994. – Vol. 3. – P. 302.
- 22 Buss R.J., Hareland W.A. Gas phase particulate formation in radiofrequency fluorocarbon plasmas // Plasma Sources Sci. Technol. – 1994. – Vol. 3. – P. 268.
- 23 Pilch, I., Söderström, D., Lundin, D., Helmersson, U. The use of Highly Ionized Pulsed Plasmas for the Synthesis of Advanced Thin Films and Nanoparticles // KONA Powder and Particle Journal – 2014. – Vol.31. – P.171–180.
- 24 Matsui, I. Preparation of magnetic nanoparticles by pulsed plasma chemical vapor synthesis // Journal of Nanoparticle Research – 2006. – Vol.8. – P.429–443.
- 25 Verdeyen J.T., Beberman J., Overzet L., Vac J. Modulated discharges: Effect on plasma parameters and deposition // Sci. Technol. – 1990. – Vol.8. – P.1851.
- 26 Lloret A., Bertran E., Andujar J.L., Canillas A., Morenza J.L. Ellipsometric study of a-Si:H thin films deposited by square wave modulated rf glow discharge // J. Appl. Phys. – 1991. – Vol.69. – P.632.

- 27 Howling A.A., Sansonnens L., Dorier J.-L., Hollenstein C. Time-resolved measurements of highly polymerized negative ions in radio frequency silane plasma deposition experiments // *J. Appl. Phys.* – 1994. – Vol.75. – P.1340.
- 28 De Vriendt V., Maseri F., Nonet A., Lucas S. Study of Nanoparticles Formation in a Pulsed Magnetron Discharge in Acetylene // *Plasma Processes and Polymers* – 2009. – Vol.6 – P.S6–S10.
- 29 Orazbayev S. A., Utegenov A. U., Zhunisbekov A. T., Slamyiya M., Dosbolayev M. K., Ramazanov T. S. Synthesis of carbon and copper nanoparticles in radio frequency plasma with additional electrostatic field // *Contributions to Plasma Physics*. – 2018. – Vol.58. – P.961–966.
- 30 Akhoudi A., Foroutan G. Simulation study of the nanoparticles nucleation in a pulse-modulated capacitively coupled rf acetylene discharge // *Physics of Plasmas* – 2018. – Vol.25. – P.063515.
- 31 Lin J., Hashimoto K., Togashi R., Utegenov A., Henault M., Takahashi K., Boufendi L., Ramazanov T. Transport control of dust particles by pulse-time modulated RF in dusty plasmas // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – Vol. 126. – P. 1.5093349.
- 32 Kawasaki H., Sakamoto K., Maeda S., Fukuzawa T., Shiratani M. Watanabe Y. Transition of particle growth region in SiH4 RF discharges // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol.37. – P.5757–5762.

References

- 1 C.J. Reckmeier, J. Schneider, A.S. Susha, & A.L. Rogach, *Optics Express*, 24(2), A312 (2015).
- 2 I.Y. Goryacheva, A.V. Sapelkin, & G.B. Sukhorukov, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 90, 27–37 (2017).
- 3 A.A. Kokorina, E.S. Prikhozhdenko, G.B. Sukhorukov, A.V. Sapelkin, & I.Y. Goryacheva, *Russian Chemical Reviews*, 86(11), 1157–1171 (2017).
- 4 H. Liu, J. Ding, K. Zhang, & L. Ding, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 315–337 (2019).
- 5 S.Y. Lim, W. Shen, & Z. Gao, *Chemical Society Reviews*, 44(1), 362–381 (2015).
- 6 F. Yuan, S. Li, Z. Fan, X. Meng, L. Fan,, & S. Yang, *Nano Today*, 11(5), 565–586 (2016).
- 7 C. Zhu, C. Liu, Y. Zhou, Y. Fu, S. Guo, H. Li, ... Z. Kang, *Applied Catalysis B: Environmental*, 216, 114–121 (2017).
- 8 X. Wu, C. Zhu, L. Wang, S. Guo, Y. Zhang, H. Li, ... Z. Kang, *ACS Catalysis*, 7(3), 1637–1645 (2017).
- 9 C. Zhu, C. Liu, Y. Fu, J. Gao, H. Huang, Y. Liu, & Z. Kang, *Applied Catalysis B: Environmental*, 242, 178–185 (2018).
- 10 S. Orazbayev, R. Zhumadilov, A. Zhunisbekov, M. Gabdullin, Y. Yerlanuly, A. Utegenov, & T. Ramazanov, *Applied Surface Science*, 515, 146050 (2020).
- 11 S. Orazbayev, M. Gabdullin, T. Ramazanov, M. Dosbolayev, D. Omirbekov, & Y. Yerlanuly, *Applied Surface Science*, 472, 127–134 (2018).
- 12 A. Bouchoule, *Dusty Plasmas: Physics, Chemistry and Technological Impacts in Plasma Processing*, (Wiley & Sons, 1999), 418.
- 13 C. Hollenstein, J.-L. Dorier, J. Dutta, L. Sansonnens, & A.A. Howling, *Plasma Sources Science and Technology*, 3(3), 278–285 (1994).
- 14 Y. Qin, N. Bilik, U.R. Kortshagen, & E.S. Aydin, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(8), 085203 (2016).
- 15 S. Hong, J. Berndt, & J. Winter, *Plasma Sources Science and Technology*, 12(1), 46–52 (2002).
- 16 E. Kovacevic, J. Berndt, T. Strunskus, & L. Boufendi, Size dependent characteristics of plasma synthesized carbonaceous nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 112(1) (2012).
- 17 J. Berndt, H. Acid, E. Kovacevic, C. Cachoncinle, T. Strunskus, & L. Boufendi, *Journal of Applied Physics*, 113(6), 063302 (2013).
- 18 J. Berndt, E. Kovačević, I. Stefanović, & L. Boufendi, Controlled dust formation in pulsed rf plasmas. *Journal of Applied Physics*, 106(6), 063309 (2009).
- 19 F.M.J.H. Van de Wetering, J. Beckers,, & G.M.W. Kroesen, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(48), 485205 (2012).
- 20 F. Greiner, J. Carstensen, N. Köhler, I. Pilch, H. Ketelsen, S. Knist, & A. Piel, *Plasma Sources Science and Technology*, 21(6), 065005 (2012).
- 21 H.M. Anderson, S. Radovanov, J.L. Mock, & P.J. Resnick, *Plasma Sources Science and Technology*, 3(3), 302–309 (1994).
- 22 R.J. Buss, & W.A. Harelund, *Plasma Sources Science and Technology*, 3(3), 268–272 (1994).
- 23 I. Pilch, D. Söderström, D. Lundin, & U. Helmersson, *KONA Powder and Particle Journal*, 31(0), 171–180 (2014).
- 24 I. Matsui, *Journal of Nanoparticle Research*, 8(3-4), 429–443 (2006).
- 25 J.T. Verdeyen, J. Beberman, & L. Overzet, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 8(3), 1851–1856 (1990).
- 26 A. Llorente, E. Bertran, J. L. Andujar, A. Canillas, & J. L. Morenza, *Journal of Applied Physics*, 69(2), 632–638 (1991).
- 27 A.A. Howling, L. Sansonnens, J.-L. Dorier, & C. Hollenstein, *Journal of Applied Physics*, 75(3), 1340–1353 (1994).
- 28 V.De Vriendt, F. Maseri, A. Nonet, & S. Lucas, *Plasma Processes and Polymers*, 6(S1), S6–S10 (2009).
- 29 S.A. Orazbayev, A.U. Utegenov, A.T. Zhunisbekov, M. Slamyiya, M.K. Dosbolayev, & T.S. Ramazanov, *Contributions to Plasma Physics*, 58, 961–966 (2018).
- 30 A. Akhoudi,, & G. Foroutan, *Physics of Plasmas*, 25(6), 063515 (2018).
- 31 J. Lin, K. Hashimoto, R. Togashi, A. Utegenov, M. Hénault, K. Takahashi, ... T. Ramazanov, *Journal of Applied Physics*, 126(4), 043302 (2019).
- 32 H. Kawasaki, K. Sakamoto, S. Maeda, T. Fukuzawa, M. Shiratani, & Y. Watanabe, *Japanese Journal of Applied Physics*, 37(Part 1, No. 10), 5757–5762 (1998).

3-бөлім

**КОНДЕНСИРЛЕНГЕН КҮЙ ФИЗИКАСЫ
ЖӘНЕ МАТЕРИАЛТАНУ ПРОБЛЕМАЛАРЫ.
НАНОФЫЛЫМ**

Section 3

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

Раздел 3

**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
И ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ.
НАНОНАУКА**

А.В. Копырина*  , **А.С. Абдыр** 

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

*e-mail: nastya.kopyrina.nk@gmail.com

ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА В ПОКРЫТИЯХ ТИТАНА, СФОРМИРОВАННЫХ НА СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКЕ КАТОДНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ

Основным направлением в области использования углеводородных ресурсов является создание металлогидридного аккумулятора водорода. Гидриды – твердые не летучие вещества, которые образуются при соединении некоторых металлов с водородом. Принцип использования гидридов в качестве среды для хранения водорода прост: под давлением металл захватывает водород, который растворяется в металле, образуя новое химическое вещество, а при нагревании гидрида газ отдается обратно. Металлогидридный метод аккумулирования водорода основан на способности ряда интерметаллических соединений, металлов, сплавов и композиционных материалов обратимо и селективно поглощать водород. Объектом исследования являются титановые покрытия, сформированные на образцах из нержавеющей стали 12Х18Н10Т катодно-дуговым методом. В процессе исследования проводилось ионно-плазменное осаждение покрытий. Также проводилась сканирующая электронная микроскопия. Оценивались фазовый состав и структура покрытия титана в исходном и наводороженном состоянии. Осуществлялось газофазное наводороживание с последующей оценкой влияния водорода на структуру сплава. Осуществлялось осаждение титана катодно-дуговым методом. Осаждение покрытий титана осуществлялось на установке «Радуга-Спектр», анализ микроструктуры проводилось на СЭМ с использованием микроскопа Hitachi TM-2800 газофазное насыщения водородом с использованием автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller, дифрактометр Shimadzu XRD-7000S, метод плавления в среде инертного газа с использованием анализатора водорода RHEN 602 фирмы LECO.

Ключевые слова: скорость сорбции, концентрация водорода, напыление, метод газофазного наводороживания, титановый сплав.

A.V. Kopyrina *, A.S. Abdyr

National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk

*e-mail: nastya.kopyrina.nk@gmail.com

Regularities of hydrogen accumulation and distribution in titanium coatings formed on a steel substrate by the cathode-arc method

The main direction in the field of the use of hydrocarbon resources is the creation of a metal hydride hydrogen battery. Hydrides are solid non-volatile substances that are formed when certain metals are combined with hydrogen. The principle of using hydrides as a medium for storing hydrogen is simple: under pressure, the metal captures hydrogen, which dissolves in the metal, forming a new chemical, and when the hydride is heated, the gas is given back. The metal hydride method of hydrogen storage is based on the ability of a number of intermetallic compounds, metals, alloys and composite materials to reversibly and selectively absorb hydrogen. The object of the study is titanium coatings formed on samples of 12X18H10T stainless steel by the cathode-arc method. In the course of the study, ion-plasma deposition of coatings was carried out. Scanning electron microscopy was also performed. The phase composition and structure of the titanium coating in the initial and submerged state were evaluated. Gas-phase hydrogenation was carried out, followed by an assessment of the effect of hydrogen on the alloy structure. Titanium was deposited by the cathode-arc method. Deposition of titanium coatings was carried out on the Raduga-Spektr installation, microstructure analysis was carried out on SEM using a Hitachi TM-2800 gas-phase hydrogen saturation microscope using an automated Gas Reaction Controller complex, a Shimadzu XRD-7000S diffractometer, and an inert gas melting method using a LECO RHEN 602 hydrogen analyzer.

Key words: sorption rate, hydrogen concentration, sputtering, gas-phase hydrogenation method, titanium alloy.

А.В. Копырина*, А.С. Абдыр

Томск политехникалық ұлттық зерттеу университеті, Ресей, Томск қ.

*e-mail: nastyakopyrina.nk@gmail.com

Катодтық-доғалық әдіспен болат субстратта қалыптасқан титан жабындыларында сутектің жинақталу және таралу заңдылықтары

Көмірсүтек ресурстарын пайдалану саласындағы негізгі бағыт сутектің металл гидридті аккумуляторын жасау болып табылады. Гидридтер – кейбір металдар сутегімен байланысқан кезде пайда болатын қатты ұшпайтын заттар. Гидридтерді сутекті сақтау ортасы ретінде пайдалану принципі қаралайым: қысыммен металл металда еритін сутекті үстап, жаңа химиялық зат түзеді, ал гидридті 16 қыздырганда газ қайтадан беріледі. Сутекті жинақтаудың металл гидридті әдісі бірқатар интерметалл қосылыстардың, металдардың, қорытпалардың және композициялық материалдардың сутекті қайтымды және селективті сініру қабілетіне негізделген. Зерттеу нысаны 12X18H10Ttot баспайтын болаттан жасалған үлгілерде катодтық-доғалық әдіспен қалыптасқан титан жабындары болып табылады. Зерттеу барысында жабындарды ионды-плазмалық тұндыру жүргізілді. Сонымен қатар, сканерлеуші электронды микроскопия да жүргізілді. Бастапқы және мұздатылған күйдегі титан жабынының фазалық құрамы мен құрылымы бағаланды. Газофазалық үдеудің сутек қоспасының құрылымына өсереі бағаланды. Титанды катодтық-дога әдісімен тұндыру жүргізілді. Титан жабындарын тұндыру «Радуга-Спектр» қондырғысында жүзеге асырылды. Микротұндымында талдау үшін СЭМ-суреттері Hitachi TM-2800 микроскопы арқылы анықталды. Сутегімен газ фазалық қанықтыру gas Reaction Controller автоматтандырылған кешенін пайдалану арқылы жүргізілді. Shimadzu XRD-7000S дифрактометрі мен LECO фирмасының RHEN 602 сутегі анализаторын пайдалана отырып инерпті газ ортасында балқыту әдісі пайдаланылды.

Түйін сөздер: сорбция жылдамдығы, сутек концентрациясы, тозаңдандыру, газ фазалық тасымалдау әдісі, титан қорытпасы.

Введение

В настоящее время использование углеводородных ресурсов (нефть, газ, дизель, бензин) в качестве топлива становится все менее выгодным. Данные ресурсы являются не возобновляемыми источниками энергии, производство и использование которых приводит к экологическим проблемам. Приоритетом современной науки в поиске альтернативных возобновляемых и экологически чистых источников является обеспечение человеческой энергией на ближайшие несколько сотен лет. Одним из наиболее вероятных заменителей органического топлива для транспорта и энергетики является водород. Использование водорода для выработки энергии приводит к резкому снижению загрязнения окружающей среды [1]. На пути к водородной энергетике стоит ряд проблем:

- Проблема получения и хранения водорода;
- Проблема накопления водорода на основе гидридных материалов;
- Проблема разработки автомобильных двигателей на водородном топливе.

Водородная энергетика – это направление производства и потребления энергии, которое основано на использовании водорода в качестве средства накопления, транспортировки. Проблема аккумулирования водорода или хранения

водорода является одной из главных проблем развития водородной энергетики [2]. Основное направление настоящего исследования посвящено разработке эффективных материалов накопителя водорода.

Водород, поглощенный металлом, может присутствовать в нем в различных состояниях: с образованием твердых растворов; сформировывать сегрегацию на несовершенствах кристаллической структуры; адсорбируется на поверхности микрочастиц и частиц второй фазы; накапливается в микропорах в молекулярной форме; образует гидриды с основным металлом; взаимодействует с легирующими элементами и вторыми фазами [3].

Наличие даже малых примесей водорода приводит к пониженной пластичности, увеличению склонности к образованию трещин, высокой чувствительности к концентрациям напряжений в техническом титане и $\alpha+\beta$ -сплавах. ($\alpha+\beta$)-сплавы при положительных результатах стандартных испытаний механических свойств на разрыв не выдерживают действия эксплуатационных нагрузок [4]. Совокупность явлений, связанных с вредным влиянием водорода на механические и технологические свойства титана и его сплавов, объединяется термином «водородная хрупкость титана».

Проблема получения водорода высокой чистоты, в том числе и из бедных по водороду

газовых смесей, может быть решена созданием абсорбционных установок, в которых масса дисперсного порошка или компактного материала на его основе, содержащего органическое или металлическое связующее, последовательно работает в режиме сорбции–десорбции. При этом газовая смесь может содержать очень мало водорода – до 10 – 15 об. % [5, 6, 7].

Зная энергию связи водорода в металле (используя метод TDS), можно оценить, в каком состоянии или в каком дефекте находился водород. Так, в некоторых работах [6, 7] было показано, что энергия связи водорода в форме гидридов находится в диапазоне значений от 100 кДж / моль до 110 кДж / моль, что зависит от способа включения водорода. Для краевой дислокации энергия связи составляет примерно 60 кДж / моль, и такая энергия связи будет верхним пределом для обратимых ловушек [8, 9].

Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

В качестве материала исследования использовалось плоские квадратные образцы размером 20x20x1 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Перед измерениями проводилось подготовка образцов, включая следующие этапы: 1 – шлифовка и полировка образцов с использованием карбидокремниевой шлифовальной бумаги с маркировками по ISO от 160 до 4000, 2 – промывка в ультразвуковой ванне с ацетоном в течение 20 минут, 3 – дополнительная промывка в ацетоне непосредственно перед помещением образцов в камеру установку «Радуга–спектр» для проведения ионно–плазменного покрытия.

Распределение элементов в образцах титанового сплава исследовалось методом оптической спектрометрии радиочастотного глеющего разряда [10]. Этот метод позволяет быстро анализировать поверхности и профиль глубины распределения элементов покрытия толщиной от нескольких микрометров до нескольких нанометров.

Осаждение покрытий титана (Ti) осуществлялось на установке «Радуга–Спектр» отделения экспериментальной физики Томского политехнического университета. Осаждение покрытий осуществлялось катодно–дуговым методом (физический метод) [11, 12]. Принцип метода заключается в конденсации на подложку (изделие) материала покрытия из плазменных потоков, генерируемых на катоде в катодном пятне вакуумной дуги сильноточного низковольтного

разряда. Для реализации катодно–дугового метода использовался вакуумно–дуговой испаритель с титановым катодом. Использование дугового разряда обеспечивает формирование металлической плазмы с высокой степенью ионизации (свыше 90%). Среднее зарядовое состояние ионов титана составляло ~ 2. В качестве катода использовался титан марки ВТ1-0 (99,95%).

Результаты

Осаждение титана катодно–дуговым методом на образцы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т при различных параметрах позволяет сформировать пористые и плотные покрытия с толщинами 20 и 80 мкм. Осажденные покрытия содержат 100% α-фазы титана с гексагональной плотноупакованной решеткой. Во всех образцах наблюдается характерная текстура в направлении (002), обусловленная режимами напыления покрытий. В осажденных покрытиях титана содержание водорода не превышает значения 0,0013 масс. %, покрытие равномерное, переход покрытие–подложка четко выражен.

По линейным участкам кривых сорбции были определены значения скорости сорбции водорода для каждой серии образцов для каждой температуры наводороживания. Кроме того, было определено максимальное значение концентрации водорода, которое накапливается в образце. Данное значение концентрации водорода определяется волюметрическим способом при помощи специального программного обеспечения автоматизированного комплекса GasReactionController. Измерение содержания водорода двумя способами позволяет в целом повысить точность определения концентраций водорода.

Образцы I серии, покрытия титана толщиной 20 мкм накапливают 3,96 масс. % водорода при наводороживании при температуре 450 °C (рис. 1). Увеличение температуры наводороживания до 500 °C приводит к снижению емкости до 3,24 масс. %. Дальнейшее увеличение температуры до 550 °C приводит к еще большему снижению емкости до 2,84 масс. %. Образцы II серии, покрытия титана толщиной 80 мкм накапливают 3,98 масс. % водорода при наводороживании при температуре 450 °C (рис. 2). Увеличение температуры наводороживания до 500 °C приводит к снижению емкости до 1,29 масс. %. Дальнейшее увеличение температуры до 550 °C приводит к еще большему снижению емкости до 0,78 масс. %.

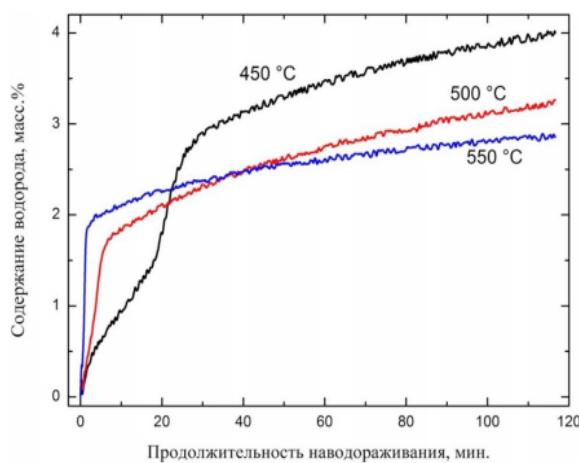


Рисунок 1 – Кривые сорбции водорода при различных температурах наводороживания образцов из I серии с покрытием толщиной 20 мкм

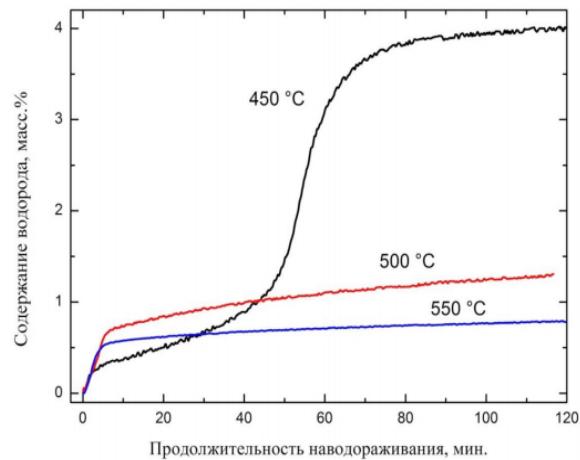


Рисунок 2 – Кривые сорбции водорода при различных температурах наводороживания образцов из II серии с покрытием толщиной 80 мкм

Заключение

Установлены закономерности накопления и распределения водорода в покрытиях титана, сформированных на стальной подложке катодно-дуговым методом. Особенности структурно-

фазового состояния покрытий титана после наводороживания коррелируют с закономерностями процесса наводороживания. Для всех серий образцов фазовый состав зависит от концентрации водорода: чем больше концентрация водорода, тем выше объемная доля гидридов в покрытии.

Литература

- 1 Ажажа В.М., Тихоновский М.А., Шепелев А.Г., Курило Ю.П., Пономаренко Т.А., Виноградов Д.В. Материалы для хранения водорода: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках // Вопросы атомной науки и техники. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2006. – № 1. – С.145 – 152.
- 2 Звягинцева А.В., Артемьева А.О. Современные накопители водорода на основе гибридных функциональных материалов //Журнал Вестник воронежского государственного технического университета. – 2017. – №5 том 13. – С.133-152.
- 3 Гельд П.В., Рябов Р.А. Водород и свойства металлов и сплавов. – М.: Наука, 1988. 182 с.
- 4 Мордовин В.П., Кузев С.В. Получение водородаккумулирующего сплава TiFe и его применение в гидридной ходильной установке // Журнал машиностроение и инженерное образование. – 2010. – С.31-39.
- 5 Lee S.M., Lee Y.L. Structural relaxation and hydrogen solubility in an amorphous Pd80Si20 alloy // Journal of Applied Physics. – 1988. – Vol.63. – No. 9. – P. 4758-4760.
- 6 Furuya Y., Takasaki A., Mizuno K., Yoshiie T. Hydrogen desorption from pure titanium with different concentration levels of hydrogen //Journal of Alloys and Compounds. – 2007. – Vol. 446. – P. 447-450.
- 7 Eliezer D., Tal-Gutelmacher E., Cross C. E., Boellinghaus T. Hydrogen trapping in β -21S titanium alloy //Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 421. – No. 1. – C. 200-207.
- 8 Tal-Gutelmacher E., Eliezer D., Abramov E. Thermal desorption spectroscopy (TDS) – Application in quantitative study of hydrogen evolution and trapping in crystalline and non-crystalline materials //Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Vol. 445. – P. 625-631.
- 9 Pressouyre G.M., Bernstein I.M. An example of the effect of hydrogen trapping on hydrogen embrittlement // Metallurgical Transactions A. – 1981. – Vol. 12. – No 5. – P. 835-844.
- 10 Nelis T., Pallosi J. Glow discharge as a tool for surface and interface analysis //Applied Spectroscopy Reviews. – 2006. – Vol. 41. – No. 3. – P. 227-258.
- 11 Yartys V.A., Lototskyy M.V., Akiba E., and et al. Magnesium based materials for hydrogen based energy storage: Past, present and future //International Journal of Hydrogen Energy. –2019. – No15. – P.7809–7859.
- 12 Галактионова Н.А. Водород в металлах. – М.: Металлургиздат, 1985. – 157 с.

References

- 1 V. M. Ajazha, M.A. Tikhonovsky, A.G. Shepelev, Yu.P. Kurilo, T.A. Ponomarenko, D.V. Vinogradov, Issues of atomic science and technology. Vacuum, clean materials, supercomputers, 1, 145-152 (2006). (in Russ).
- 2 A.V. Zvyagintseva, A.O. Artemyeva, Journal Bulletin of Voronezh State Technical University, 5 (13), 133-152 (2017) (in Russ).

- 3 P.V. Geld and R.A. Ryabov, Water and its properties of metals and alloys, (Moscow, Nauka, 1988), 182 p.
- 4 V.P. Mordovin, S.V. Kutsev, Journal of Engineering and engineering education, 31-39 (2010). (in Russ).
- 5 S.M. Lee, Y.L. Lee, Journal of Applied Physics, 63 (9), 4758-4760 (1988).
- 6 Y. Furuya, A. Takasaki, K. Mizuno, T. Yoshiie, Journal of Alloys and Compounds, 446, 447-450 (2007).
- 7 D. Eliezer, E. Tal-Gutelmacher, C.E. Cross, T. Boellinghaus, Materials Science and Engineering: A, 421 (1), 200-207 (2006).
- 8 E. Tal-Gutelmacher, D. Eliezer, E. Abramov, Materials Science and Engineering: A 445, 625-631 (2007).
- 9 G.M. Pressouyre, I.M. Bernstein, Metallurgical Transactions A 12 (5), 835-844 (1981).
- 10 T. Nelis and J. Pallosi, Applied Spectroscopy Reviews, 41 (3), 227-258 (2006).
- 11 V.A. Yartys, M.V. Lototskyy, E. Akiba, and et al. International Journal of Hydrogen Energy 15, 7809-7859 (2019).
- 12 N.A. Galaktionova, Vodorod in metals (Moscow, Metallurgizdat, 1985), 157 p. (in Russ).

E.S. Коршиков*  , **Г.Б. Сапаргалиева** 

Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы
e-mail: e.s.korshikov@physics.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕКОНДЕНСАТОВ CCl_4 , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КРИОМАТРИЧНОЙ ИЗОЛЯЦИИ.

Инфракрасная спектроскопия молекулярных соединений представляет собой актуальную методику для изучения низкотемпературных объектов в Солнечной системе и за ее пределами. В научной исследовательской среде представлено целое направление исследований низкотемпературных, аморфных и кристаллических состояний фаз, идентифицированных в планетарно научных работах. Существует полезный симбиоз между результатами данных, полученных в ходе анализа космических аппаратов и модельных экспериментальных установках в земных условиях их выполнения. В данной работе представлены результаты исследования оптических свойств и методики криоматричной изоляции криоконденсатов CCl_4 . В качестве матричного газа использовались азот N_2 и аргон Ar (чистотой 99,99%), представляя собой оптически прозрачный в ИК диапазоне исследований матричный газ. Диапазон оптических исследований – 400–4200 cm^{-1} , температурный интервал существования криоконденсатов – $T = 16 - 120 \text{ K}$. Изучены оптические характеристики реконденсатов CCl_4 в процессе сублимации матричного газа при термоциклировании образцов реконденсатов с поверхности конденсации. Экспериментально обнаружено и подтверждено для криоконденсатов CCl_4 существование стабильного структурного состояния в интервале низких температур. Данный факт может использоваться в методике для изучения стабилизации молекулярных соединений при соконденсации на охлажденные поверхности в высоком вакууме. В качестве криоматрицы в интервале температур $T = 16 - 80 \text{ K}$ можно использовать CCl_4 .

Ключевые слова: криоконденсат, ИК-спектр, реконденсат, подложка, аргон.

E.S. Korshikov*, G.B. Sapargalieva
Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty
*e-mail: e.s.korshikov@physics.kz

Research of optical properties of recondensats CCl_4 received method of cryomatrix isolation

Infrared spectroscopy of molecular compounds represents the most relevant method for studying low-temperature objects in the solar system and beyond. The whole research area represents the study of low-temperature, amorphous and crystalline states of phases, identified in planetary scientific work. There is a useful symbiosis between the results obtained in the course of the analysis of spacecraft and model experimental installations in their terrestrial conditions. This work presents the results of the study of optical properties and methods of cryomatrix isolation of CCl_4 . Argon Ar and nitrogen N_2 (pure 99.99%) was used as the matrix gas, representing its optically transparent in the IR range of matrix gas studies. Range of optical studies 400–4200 cm^{-1} , temperature range of cryocondensates $T = 16 - 120 \text{ K}$. The optical characteristics of CCl_4 condensates have been studied in the process of sublimation of matrix gas during thermocycling of condensate samples with condensation surface. Experimentally discovered and confirmed for cryocondensates CCl_4 the existence of a stable structural state in the low temperature range. This fact can be used in the method of studying the stabilization of molecular compounds during condensation on cooled surfaces in high vacuum. As a cryomatrix in the temperature range $T = 16 - 80 \text{ K}$ can use CCl_4 .

Key words: Cryocondensate, IR-spectrum, recondensate, substrate, argon.

Е.С. Коршиков*, Г.Б. Сапаргалиева

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.
*e-mail: e.s.korshikov@physics.kz

**Криоматрицаны оқшаулау арқылы алынған
 CCl_4 реконденсаттарының оптикалық қасиеттерін зерттеу**

Молекулалық қосылыстардың инфрақызыл спектроскопиясы Күн жүйесіндегі және одан тыс жерлерде тәмен температуралы нысандарды зерттеудің өзекті әдісі болып табылады. Тәмен температуралы, аморфты және кристалды фазалық құйлерді зерттеудің бүкіл бағыттары көптеген ғылыми еңбектерде ұсынылған. Гарыш аппараттарын талдау барысында алынған нәтижелер мен оларды іске асырудың жердегі жағдайларда дайындалған модельдік қондырығы түрлері арасында пайдалы симбиоз бар екені белгілі. Бұл жұмыста CCl_4 криоконденсаттарының оптикалық қасиеттері мен криоконденсатты оқшаулау әдісінің зерттеу нәтижелері көлтірілген. Матрицалық газ ретінде азот N_2 пен аргон Ar (тазалығы 99,99%) пайдаланылды. Инфрақызыл зерттеу диапазонында олар оптикалық мөлдір матрицалық газ болып табылады. Оптикалық зерттеу диапазоны 400-4200 cm^{-1} , криоконденсаттардың өмір сүру қабылетінің температуралық аралығы $T = 16\text{-}120 \text{ K}$. Конденсация бетінен реконденсаттар үлгілерін термоциклдеу кезінде матрицалық газды сублимациялау процесіндегі CCl_4 реконденсаттарының оптикалық сипаттамалары зерттелді. CCl_4 криоконденсаттары үшін тәмен температура диапазонында тұрақты құрылымдық қүйдің болуы эксперименталды түрде анықталды және расталды. Бұл фактіні жоғары вакуумдағы салқындастылған беттерге соконденсациялау кезінде молекулалық қосылыстардың тұрақтануын зерттеуге арналған әдістемелерде қолдануға болады. $T = 16\text{-}80 \text{ K}$ температура аралығында криоматрица ретінде CCl_4 қолдануға болады.

Түйін сөздер: криоконденсат, ИК-спектр, реконденсат, тәсемше, аргон.

Введение

Современные исследования, направленные на идентификацию молекул и многоатомных ионов в планетных и межзвездных средах в основном полагаются на лабораторные результаты химических и физических свойств, в особенности на спектроскопические данные [1]. Актуальной задачей является установление закономерностей образования и существования структурных трансформаций в криоконденсатах широкого спектра соединений [2-4]. Таким образом существует глобальный симбиоз между теоретическими исследованиями и экспериментальными работами с хорошо контролируемыми условиями их проведения.

В этом смысле метод криоматричной изоляции при совместной конденсации образцов демонстрирует уникальную возможность получения различного рода состояний структур образцов широкого спектра веществ, путем газофазной конденсации на криогенных поверхностях. При этом основные параметры криосаждения, такие как температура подложки, давление газовой фазы и ее концентрация могут быть изменены и поддерживаемы с необходимою высокой точностью [5].

Обширные исследования ведутся в крупных мировых центрах в рамках общей программы определения веществ и анализе свойств при об-

разовании криоконденсатов на объектах открытого космоса [6-9].

Множество экспериментальных задач и технических условий, которые можно решить с использованием метода криоматричной изоляции, в которые входит установление связи между структурой конденсируемых молекул и условиями их криосаждения с одной стороны, и свойствами образующихся при низких температурах пленок, таких как степень стабильности, с другой стороны. В частности, речь может идти о проверке роли молекулярного строения и скорости осаждения исследуемых веществ в процессе образования неупорядоченных состояний и последующих термостимулированных трансформаций в образцах [10].

ИК-спектрометрические исследования, в свою очередь, могут предоставить информацию об индивидуальных колебаниях молекулы тетрахлорметана и их реакциях на термостимулированные превращения в исследуемых образцах.

Исследования процессов криоконденсации и свойств тонких пленок вакуумных конденсатов подтвердили факт о том, что метод физического сухого вакуумного осаждения является эффективным способом получения стеклообразных аморфных состояний простейших газов. Это является причиной интенсивного использования этого метода в последние несколько лет для из-

учения широкого спектра стеклообразующих веществ [11-15].

Подводя итог вышеизложенному, нами были проведены ИК-спектрометрические исследования процессов образования и структурных трансформаций в криовакуумных конденсатах криоматрично изолированного CCl_4 , в аргоне. Основным фактором для проведения таких исследований состоит еще и в том, что ИК-спектрометрические исследования могут дать информацию об отдельных колебаниях молекулы тетрахлорометана, их реакции на термостимулированные превращения в исследуемых образцах.

Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

В данной работе предлагаются результаты ИК-спектрометрических исследований тонких пленок криовакуумных конденсатов CCl_4 , образованных на металлической подложке в интервале температур от 16 до 100 К и давлений газовой фазы $P=10^{-5}$ Тор. Как известно [15], молекула тетрахлорометана является сферически симметричной молекулой, у которой, (по аналогии с водородом в молекуле метана) молекулы хлора располагаются по углам равностороннего тетраэдра, а углерод расположен в центре этого тетраэдра. В соответствии с тетраэдрической моделью в инфракрасной части спектра проявляются в основном две сильные полосы поглощения – на частоте 305 см^{-1} и дублет в окрестностях частоты $v_3 = 775 \text{ см}^{-1}$ с максимумами поглощения на частотах 768 см^{-1} и 797 см^{-1} . Расщепление полосы связано с резонансом Ферми. Полоса на частоте 305 см^{-1} находится вне рабочего диапазона спектрометра ИКС-29, таким образом, в данной работе мы анализируем положение и амплитуду поглощения указанного дублета.

Экспериментальная установка и методика проведения измерений была нами ранее подробно описана [16], так что ограничимся краткой информацией об основных параметрах установки и особенностях работы с тетрахлорометаном. Цилиндрическая вакуумная камера диаметром и высотой 450 мм изготовлена из нержавеющей стали. Ее откачка осуществляется турбомолекулярным насосом Turbo-V-301 до предельного вакуума 10^{-8} Тор. Давление в камере измеряется преобразователем FRG-700 с контроллером AGC-100. В центре камеры расположена подложка (меди, покрытая слоем серебра), закрепленная на верхнем фланце криогенной системы

Гиффорда-МакМагона. Предельная температура охлаждения криостата $T=12$ К. Измерение температуры осуществляется платиновым терморезистором с помощью термоконтроллера M335/20с. Регистрация спектров поглощения проводилась с помощью ИК-спектрометра ИКС-29 в интервале частот $400\text{-}4200 \text{ см}^{-1}$. Измерения скорости конденсации и коэффициента преломления пленки осуществлялось с помощью двухлучевого лазерного интерферометра. Длина волны лазеров составляла 420 нм. Чистота тетрахлорометана составляла 99,2%. Непосредственно перед измерениями проводилась дегазация, со суд с CCl_4 откачивался до давления 0,1 Тор.

Таким образом, порядок проведения экспериментов был следующим. Камера откачивалась до давления 10^{-8} Тор, после чего подложка охлаждалась до температуры $T=16$ К. Далее с помощью натекателя, соединенного с системой пробоподготовки газов N_2 , Ar и CCl_4 , осуществлялся напуск смеси газа в камеру до достижения рабочего давления криоконденсации ($10^{-4}\text{-}10^{-6}$ Тор). С помощью лазерных интерферометров регистрировались интерферограммы роста для двух различных углов падения. На основании этих данных по аналогии с [17,18] рассчитывались коэффициенты преломления, скорость конденсации и толщина пленки. Далее напуск газа прекращался и при фиксированной толщине пленки и температуре подложки измерялся спектр поглощения пленки криоконденсатов, после чего спектрометр устанавливался на выбранной частоте наблюдения и измерялся сигнал спектрометра на данной частоте в ходе изменения температуры образца.

Результаты и обсуждение

Таким образом в результате исследований оптических свойств криоконденсатов CCl_4 была также отработана методика криоматричной изоляции. В качестве матричного газа использовались два инертных газа, азот и аргон. В системе пробоподготовки газов экспериментальной установки напускались по очереди CCl_4 и один из инертных газов в концентрации 50/50 %.

Далее так называемая смесь напускалась в вакуумную камеру до давления конденсации над подложкой порядка $P=10^{-5}$ Торр. Толщины пленок криоконденсатов смеси составляли $d=2,5$ мкм. Измерения ИК спектроскопии проводились при температурах от $T=16$ К и вплоть до температуры сублимации образцов. Тем самым получены спектры при $T=16$ К и после отжига пленки $T=94$ К. На рисунке 1 представлены характерные

кривые полос поглощения смеси CCl_4 и аргона при данных температурах.

Как видно из представленных данных на рисунке 1 в процессе отогрева пленки криоконден-

саторов существует изменение полос поглощения в интервале характеристических колебаний молекул CCl_4 . Более наглядное изменение полосы на частоте 804 см^{-1} показаны на рисунке 2.

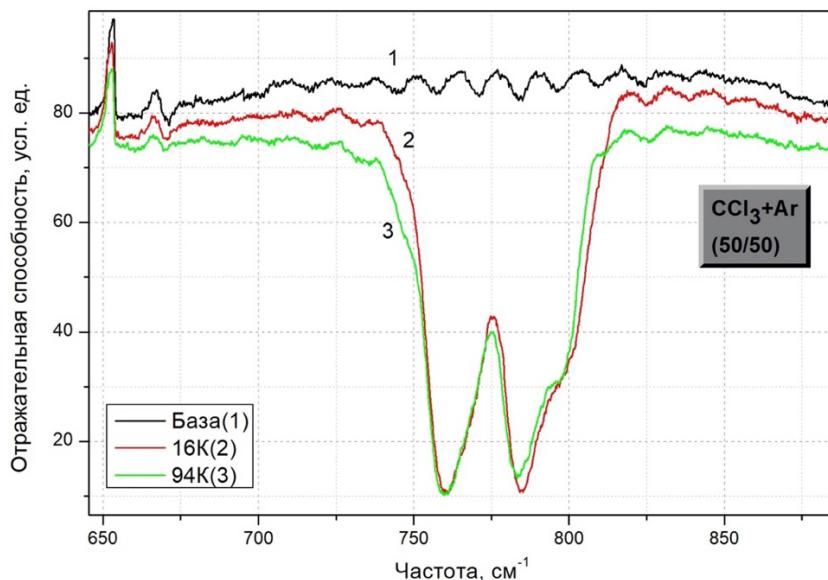


Рисунок 1 – ИК спектры CCl_4 в смеси с матричным газом Аргон

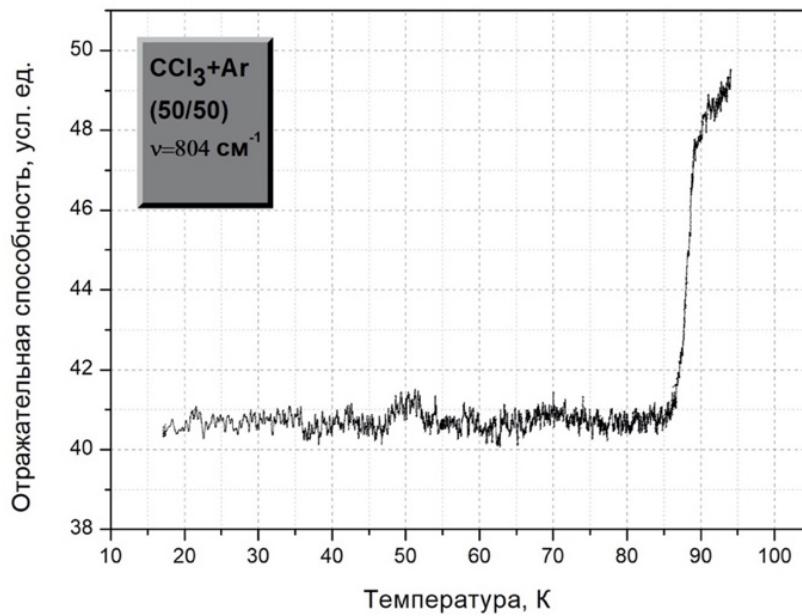


Рисунок 2 – Отогрев пленки криоконденсатов $\text{CCl}_4 + \text{Ar}$ на частоте 804 см^{-1}

Из представленных данных хорошо видно изменение амплитуды характеристической частоты в процессе термовариаций. Как уже сообщалось ранее в работе при температуре по-

рядка $T=85\text{K}$ происходит структурный переход в пленке образца криоконденсата. На рисунке 3 представлен полный цикл термограмм отогрева пленки криоконденсатов с характеристическими

значениями давлений в процессе отогрева. Как видно из рисунка 3 в полученного наборе данных можно выделить два этапа: по показаниям давлений в диапазоне температур происходит выход остаточного аргона из смеси пленки. В интервале температур 85-90 К из пленки криоконденсата выходит оставшийся аргон в процессе структурных перестроений молекул CCl_4 . Данный факт объясняется на довольно большом процентном соотношении концентрации смеси

образцов, тем самым получается, что сам CCl_4 долгое время служит в качестве матрицы для молекул аргона. Отогрев пленки выше 100 К сопровождается изменением полосы поглощения на частоте 804cm^{-1} вплоть до температуры сублимации всего образца $T=130\text{K}$.

На рисунке 4 представлены результаты ИК спектрометрических исследований матричной смеси газов CCl_4 и азот N_2 в процентном соотношении 50/50 %.

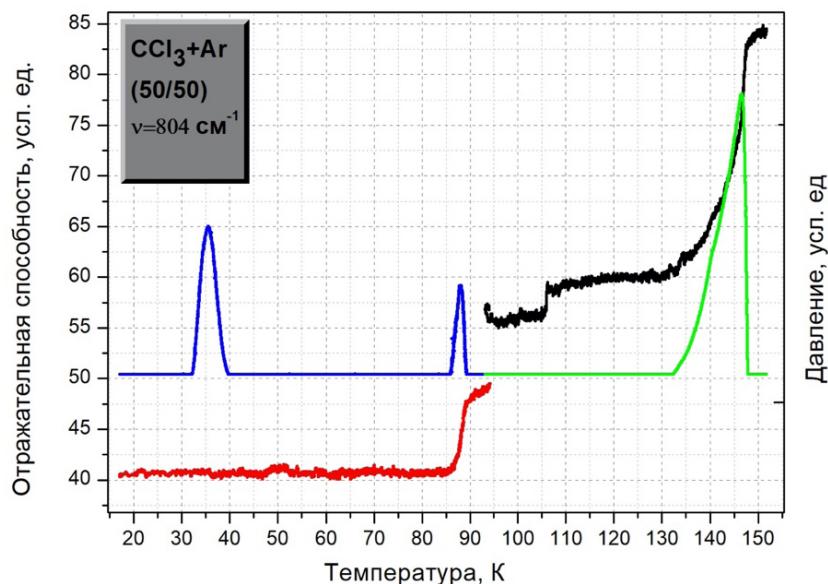


Рисунок 3 – Отогрев пленки $\text{CCl}_4 + \text{Ar}$ на частоте 804 cm^{-1} с приведёнными значениями для давления в вакуумной камере

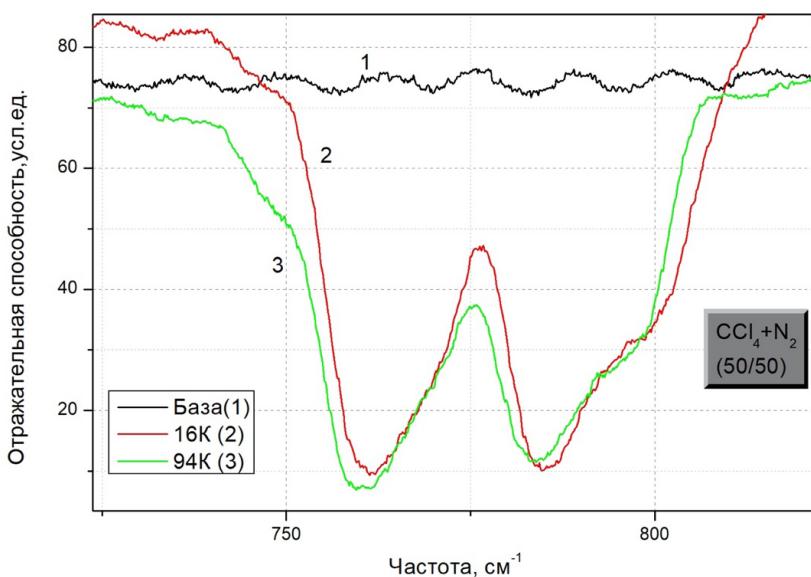


Рисунок 4 – ИК спектры CCl_4 в смеси с матричным газом азот

ИК спектроскопические данные показывают изменение полосы поглощения при термовариации образца.

На рисунке 5 представлен полный цикл термограмм отогрева пленки криоконденсатов с характеристическими значениями давлений в процессе отогрева.

Как видно из рисунка в полученного набора данных можно выделить два этапа: по показаниям давлений в диапазоне температур происходит выход остаточного азота из смеси пленки.

В интервале температур 78-80 К из пленки криоконденсата выходит оставшийся аргон в процессе структурных перестроек молекул CCl_4 . Данный факт объясняется на довольно большом процентном соотношении концентрации смеси образцов, тем самым получается, что сам CCl_4 долгое время служит в качестве матрицы для молекул азота. Отогрев пленки выше 100 К сопровождается изменением полосы поглощения на частоте 804cm^{-1} вплоть до температуры сублимации всего образца $T=130\text{K}$.

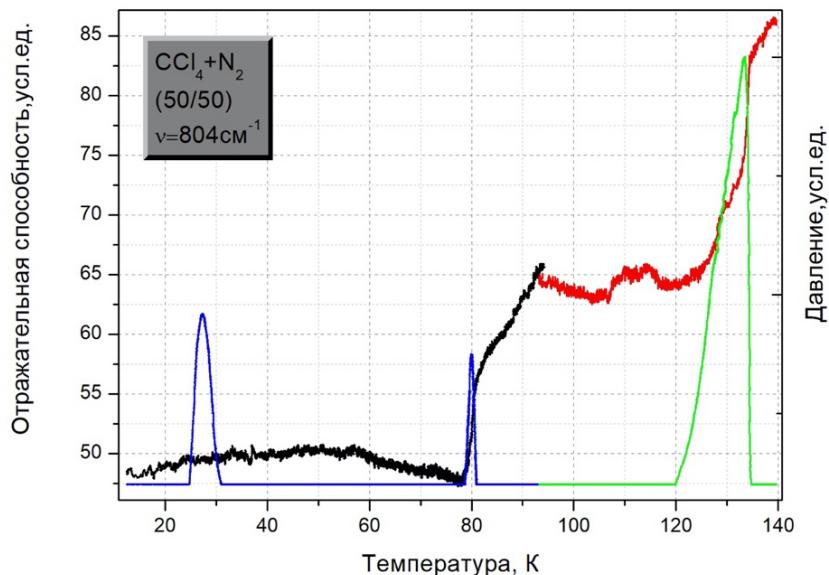


Рисунок 5 – Отогрев пленки $\text{CCl}_4 + \text{N}_2$ на частоте 804 cm^{-1} с приведёнными значениями для давления в вакуумной камере

Заключение

Получены экспериментальные результаты отражательных характеристик тонких пленок криоконденсатов CCl_4 в матрице азота и матрице аргона в интервале температур $T=16-120\text{K}$. Исследованы термостимулированные превращения на частоте наблюдения 804 cm^{-1} . Из полученных данных следует, что криоконденсаты CCl_4 в данном интервале температур способны к криозахвату молекул других газов, тем самым делается вывод о возможности применения первого в качестве самого элемента матрицы при исследо-

дованиях образования и формирования молекулярных соединений при низких температурах и высоком вакууме.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан. Грант № АР08052736 – «Исследование влияния криоконденсационного излучения на оптические характеристики рабочих поверхностей криогенного оборудования».

Литература

- 1 Zimmerman R., Pimentel G. The infrared spectrum of ice; temperature dependence of the hydrogen bond potential function //Advances in molecular spectroscopy. – New York.: Bentwood, 1962. – Vol. 2. – P. 726 – 737.
- 2 Grant E.H., Buchanan T.J., Cook H.F. Deflections of plates on elastic foundation //J. Chem. Phys. – 1957. – Vol. 26, № 6. – P. 156 – 175.
- 3 Bjerrum N. Structure and properties of ice //Science. – 1952. – Vol.115, № 2989. – P. 385 – 390.
- 4 Bertie J.E., Whalley E. Infrared spectra of ices II, III and V in the range 4000 – 350 cm⁻¹ // J. Chem. Phys. – 1964. – Vol.40, № 8. – P. 163 – 165.
- 5 Sivakumar T.C., Rice S.A., Sceats M.G. Raman spectroscopic studies of the OH stretching region of low density amorphous solid water and of polycrystalline ice Ih / J. Chem. Phys. – 1978. – Vol. 69, № 8. – P. 346 – 347.
- 6 Vedder W., Hornig D.F. Interaction potential of ice crystals //Adv. Spectrosc. – 1961. – Vol.2. – P. 189 – 197.
- 7 Pimentel G.C., McClellan A.L. The hydrogen bond. –San Francisco.: Freeman, 1960. – P. 169 – 187
- 8 Bader R.F.W. IR – spectra and interaction potential of ice //Can. J. Chem. – 1964. – Vol. 42. – P. 122 – 135.
- 9 Bertie J.E., Whalley E. Infrared Spectra of Ices Ih and Ic in the Range 4000 to 350 cm⁻¹ //J. Chem. Phys. – 1964. – Vol. 40, № 6. – P. 137 – 145.
- 10 Drobyshev A., Aldiyarov A., Abdykalykov K., Panchenko G. Change of IR – spectrum and enthalpy of H – bond in thin films of water cryocondensates //LTP. – 2003. – Vol. 29, № 8. – P. 669 – 673.
- 11 Дробышев А., Алдияров А., Катпаева К., Коршиков Е., Курносов В., Шинбаева А. О стабильности нанокластеров воды и тяжелой воды в криоматрице азота // Физика низких температур. – 2014. – Вып. 40(11). – С. 1281–1289.
- 12 Дробышев А., Алдияров А., Катпаева К., Коршиков Е., Курносов В., Соколов Д. О стабильности нанокластеров этанола в криоматрице азота // Low Temperature Physics. – Вып.: 39. – С.961. – 2013.
- 13 Коршиков Е., Дробышев А., Стржемечный Ю. Процессы и явления, сопровождающих взаимодействие газов с поверхностями криогенно-вакуумного оборудования // Международная конференция студентов и молодых ученых «Фараби Элемі». – Алматы, 2017. – С.187.
- 14 Коршиков Е., Дробышев А., Алдияров А., Соколов Д. Исследование отражательных характеристик криоконденсаторов закиси азота и этанола // Вестник КазНУ. Серия физическая. – 2017. – №2(61). – С. 72 – 77.
- 15 Drobyshev A., Aldiyarov A. and et al. Molecular dynamics simulation of thermodynamic and transport properties of H-bonded low-temperature substances // Low. Temp. Phys. -2015. – Vol. 41(6). – P. 552.
- 16 Glenn S. Orton, Optical Constants of Liquid and Solid Methane // Applied Optics. – 1994. – P. 12.
- 17 Brunetto R., Caniglia G., Baratta G. A., and Palumbo M. E. Integrated near-infrared band strengths of solid CH4 and its mixtures with N2 //Astrophysical Journal. – 2008. –Vol. 20. –P. 686.
- 18 Drobyshev A., Abdykalykov K., Aldiyarov A., Kurnosov V., Tokmoldin N. IR spectra of water polyaggregates in a nitrogen cryomatrix // Low Temperature Physics. – 2007. – Vol. 33. – P. 699.

References

- 1 R. Zimmerman, G. Pimentel, Advances in molecular spectroscopy, 2, 726 – 737 (1962).
- 2 E.H. Grant, T.J. Buchanan, and H.F. Cook, J. Chem. Physics, 26 (6), 156-175 (1957).
- 3 N. Bjerrum, Science, 115 (2989), 385-390 (1959).
- 4 J.E. Bertie and E.Wally, J. Chem. Physics, 40 (8), 163-165 (1964).
- 5 T.S .Sivakumar, S.A. Rice, M.G. Skeets, J. Chem. Fiz., 69 (8), 346 – 347 (1978).
- 6 U. Vedder, D.F. Hornig, Adv. Spectrosc., 2, 189 – 197 (1961).
- 7 G.C. Pimentel, A.L. McClellan, The Hydrogen bond, (San Francisco, Freeman, 1960), pp. 169-187.
- 8 R.F.V. Bader, Can. J. Chem, 42, 122-135 (1964).
- 9 J.E. Bertie, E. Wally, J. Chem. Physics, 40 (6), 137-145 (1964).
- 10 A. Drobyshev, A. Aldiyarov, K. Abdykalykov, G. Panchenko, LTP, 29 (8), 669-673 (2003).
- 11 A. Drobyshev, A. Aldiyarov, K. Katpaeva, E. Korshikov, V. Kurnosov, A. Shinbayeva, Low Temperature Physics, 40(11), 1281-1289 (2014).
- 12 A. Drobyshev, A. Aldiyarov, K. Katpaeva, E. Korshikov, V. Kurnosov, D. Sokolov, Low Temperature Physics, 39, 961 (2013).
- 13 E. Korshikov, A. Drobyshev, Yu. Strzhemechny, Processes and phenomena accompanying the interaction of gases with the surfaces of cryogenic-vacuum equipment, International Conference of students and Young Scientists “Farabi Alemi”, Almaty, 2017, 187 (2017). (in Russ.).
- 14 E. Korshikov, A. Drobyshev, A. Aldiyarov, D. Sokolov, Recent Contributions to Physics, 2 (61), 72-77 (2017). (in Russ.).
- 15 A. Drobyshev, A. Aldiyarov, et al., Low. Temp. Phys., 41 (6), 552 (2015).
- 16 S. Orton Glenn, Applied Optics, 12 (1994).
- 17 R. Brunetto, G. Canilla, G.A. Baratta, M.E. Palumbo, Astrophysical Journal, 20, 686 (2008).
- 18 A. Drobyshev, K. Abdykalykov, A. Aldiyarov, V. Kurnosov, N. Tokmoldin, Physics of Low Temperatures, 33, 699 (2007).

4-бөлім

ЖОҒАРЫ МЕКТЕПТЕ

ФИЗИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ

Section 4

METHODS OF TEACHING

HIGH SCHOOL PHYSICS

Раздел 4

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ

ФИЗИКИ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

Ye.A. Daineko^{1,2*}  **, M.T. Ipalakova¹** ,
D.D. Tsøy¹  **, A.M. Seitnur¹** 

¹International University of Information Technologies, Kazakhstan, Almaty

²Institute of Applied Sciences and Information Technologies, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: y.daineko@edu.iitu.kz

THE ROLE OF NEW INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN MODERN EDUCATION

The technological advances of the last 15 years have made a huge contribution to modern society, transforming education and training. Computers and the Internet allow teachers and students to work, learn, and receive information in ways that were once unthinkable. One of the latest and yet most exciting technological developments in education is the use of virtual reality (VR) and augmented reality (AR) to enhance learning opportunities. Virtual reality and augmented reality allow users to interact with computer environments, real or imagined. VR also allows users to receive visual, auditory, tactile, smell, and taste inputs in three-dimensional space.

As a result, the authors implemented a virtual laboratory with the possibility of conducting a virtual experiment, which includes practical and theoretical tasks in high school physics, as well as a set of animations. When developing the virtual electronic laboratory, agile software development methodologies, computer modeling methods, and object-oriented programming were used. As a virtual reality device, the Leap Motion motion controller was chosen, designed to track the movements of hands and fingers in space and used for human-computer interaction. The article provides UML activity diagrams for working and interacting with the application. The cross-platform Unity 3D environment, which implements the WORA (write once, run anywhere) principle, was chosen as the development platform. Thanks to this principle, a once-written application can be built for personal computers, mobile devices, mixed reality helmets, and many other platforms. The application functionality was written in the C# programming language. Graphic models were created using Substance Painter. The developed application can be used by students of senior classes of secondary and specialized schools, students of technical majors of higher educational institutions, as well as any interested users.

Key words: virtual laboratory, augmented reality, virtual reality, 3D modeling, Unity3D, C# (CSharp).

Е.А. Дайнеко^{1,2*}, М.Т. Ипалакова¹, Д.Д. Цой¹, А.М. Сейтнұр¹

¹Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан, Алматы к.

²Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, Қазақстан, Алматы к.

*e-mail: yevgeniyadaineko@gmail.com

Заманауи білім берудегі жаңа инфокоммуникациялық технологиялардың рөлі

Соңғы 15 жылдағы технологиялық жетістіктер білім беру мен кадрларды даярлауды қайта құру арқылы қазіргі қоғамға үлкен үлес қосты. Компьютерлер мен Интернет мұғалімдер мен студенттерге жұмыс істеуге, оқуға және бір кездері мүмкін емес ақпарат алуға мүмкіндік береді. Білім беру саласындағы соңғы және сонымен бірге ең қызықты технологиялық, өзірлемелердің бірі – білім беру мүмкіндіктерін кеңейту үшін виртуалды шындықты (VR) және толықтырылған шындықты (AR) пайдалану болып табылады. Виртуалды шындық және толықтырылған шындық пайдаланушыларға нақты немесе қиялдағы компьютерлік орталармен өзара әрекеттесуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ, VR пайдаланушыларға үш өлшемді кеңістікте визуалды, есту, тактильді, иіс пен дәм кірістерін алуға мүмкіндік береді.

Нәтижесінде авторлар виртуалды эксперимент жүргізу мүмкіндігі бар виртуалды зертхананы іске асырды, оған орта мектеп бағдарламасының физикасы бойынша практикалық және теориялық, тапсырмалар, сондай-ақ, анимациялар жиынтығы енгізілді. Виртуалды электрондық зертхананы өзірлеу кезінде бағдарламалық қамтамасыз етуді өзірлеудің икемді әдіснамасы, компьютерлік модельдеу және обьектіге бағытталған бағдарламалашу әдістері қолданылды. Виртуалды шындық құрылғысы ретінде кеңістіктегі қол мен саусақ қимылдарын бақылауға арналған және адам-

компьютерлік өзара әрекеттесу үшін қолданылатын Leap Motion қозғалыс контроллері таңдалды. Мақалада UML қосымшамен жұмыс істеуге және өзара әрекеттесуге арналған әрекеттер кестесі берілген. Әзірлеу платформасы ретінде WORA (write once, run anywhere) жұмыс принципін жүзеге асыратын Unity 3D кросс-платформалық ортасы таңдалды. Осы қағидаттың арқасында бір рет жазылған қосымшаны дербес компьютерлер, мобильді құрылғылар, аралас шындық шлемдері және басқа да көптеген платформалар үшін жинауға болады. Leap Motion қозғалыс контроллері виртуалды шындық құрылғысы ретінде пайдаланылды. Қосымшаның функционалдығы C # бағдарламалау тілінде жазылды. Графикалық модельдер Substance Painter көмегімен жасалды. Әзірленген қосымшаны орта және мамандандырылған мектептердің жоғары сынып оқушылары, жоғары оқу орындарының техникалық мамандықтарының студенттері, сондай-ақ, кез келген мүдделі пайдаланушылар пайдалана алады.

Түйін сөздер: виртуалды зертхана, толықтырылған шындық, виртуалды шындық, 3D модельдеу, Unity3D, C# (CSharp).

Е.А. Дайнеко^{1,2*}, М.Т. Ипалакова¹, Д.Д. Цой¹, А.М. Сейтнур¹

¹Международный университет информационных технологий, Казахстан, г. Алматы

²Институт прикладных наук и информационных технологий, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz

Роль новых инфокоммуникационных технологий в современном образовании

Технологические достижения последних 15 лет внесли огромный вклад в современное общество, преобразовав образование и подготовку кадров. Компьютеры и Интернет позволяют учителям и студентам работать, учиться и получать информацию таким образом, который когда-то был немыслим. Одним из последних и в то же время самых захватывающих технологических разработок в области образования является использование виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR) для расширения возможностей обучения. Виртуальная реальность и дополненная реальность позволяют пользователям взаимодействовать с компьютерными средами, реальными или воображаемыми. VR также позволяет пользователям получать визуальные, слуховые, тактильные, запаховые и вкусовые входы в трехмерном пространстве.

В результате авторами реализована виртуальная лаборатория с возможностью проведения виртуального эксперимента, в которую включены практические и теоретические задания по физике программы средней школы, а также набор анимаций. При разработке виртуальной электронной лаборатории применялись гибкие методологии разработки программного обеспечения, методы компьютерного моделирования и объектно-ориентированного программирования. В качестве устройства виртуальной реальности был выбран контроллер движения Leap Motion, предназначенный для отслеживания движений рук и пальцев в пространстве и используемый для человека-компьютерного взаимодействия. В статье приведены UML диаграммы деятельности для работы и взаимодействия с приложением. В качестве платформы разработки была выбрана кроссплатформенная среда Unity 3D, которая осуществляет принцип работы WORA (write once, run anywhere). Благодаря этому принципу единожды написанное приложение может быть собрано для персональных компьютеров, мобильных устройств, шлемов смешанной реальности и многих других платформ. Функционал приложения был написан на языке программирования C#. Графические модели были созданы с использованием Substance Painter. Разработанное приложение может быть использовано учениками старших классов средних и специализированных школ, студентами технических специальностей высших учебных заведений, а также любыми заинтересованными пользователями.

Ключевые слова: виртуальная лаборатория, дополненная реальность, виртуальная реальность, 3D-моделирование, Unity3D, C# (CSharp).

Introduction

In the age of information technology, modern society is faced with their continuous penetration into all spheres of its life. Industry, medicine, entertainment, services, and others are influenced by the rapidly developing modern technologies, which in turn is due to the continuous progress in the field of ICT (information and communication technolo-

gies). Development of new means and technologies of communication, robotics, sensor technologies, computer vision, software and hardware for modern computers, artificial intelligence, etc. on the one hand, makes it easier for a person to fulfill his professional tasks, but on the other hand, sets more and more ambitious goals for him.

Modern education is no exception. Information technology also has a huge impact on this area. And

it includes not only the computerization of all business processes of higher and secondary educational institutions, as well as any organizations, but also the introduction of new methods and teaching aids based on modern technologies. In the latter direction, a prominent place is occupied by computer training systems, for example, such as virtual laboratories.

Computer modeling within the framework of virtual laboratories allows you to thoroughly investigate the studied phenomena, processes, or substances at minimal cost, without exposing the students to any danger. Three-dimensional visualization helps to observe the process or phenomenon in space, it is also possible to look inside the studied phenomenon, which is not always possible in reality. The undoubted advantage of virtual experiments is that they can be repeated many times without additional financial costs, which certainly increases the effectiveness of such training. Physics is one of those courses for which experiments can be simulated on a computer.

In the development of this field in Kazakhstan, the authors have achieved certain success. A virtual physics laboratory (PVL) was developed with a set of three-dimensional physical experiments from a course in general physics for students of technical universities. It has been successfully introduced into the educational process of teaching physics at the International Information Technology University and other universities in Kazakhstan [1, 2].

However, not only higher, but also secondary educational institutions need such educational tools. Moreover, at this level of education, the task is not only to represent visually the process or phenomenon being studied, but also to present the material in an interesting, exciting way in order to captivate schoolchildren, who, unlike students, are not always motivated due to their age and lack of understanding of the importance of learning.

Nowadays, learners' perception can be improved with new visualization elements and gestures that modern digital technologies offer. Thus, with the technologies of augmented (AR – Augmented Reality) and virtual (VR – Virtual Reality) reality, new ways of learning come to the fore, which make it possible to reveal the student's interest in the subject being studied, stimulate positive emotions, speed up the learning process and help better assimilation. AR and VR bring a game element to the learning process, which certainly has a positive effect on the results of students.

This article is devoted to the development of a virtual electronic laboratory with a set of practical

and theoretical tasks, as well as animations with elements of augmented and virtual reality technologies for the study of physics in secondary educational institutions.

Materials and methods

Fundamentals of augmented and virtual reality technologies

Augmented reality is one of the newest and most promising technologies of the 21st century, which can also be used to develop virtual laboratories. Its applications are very broad: from game development to medicine. Augmented reality allows you to embed virtual objects in the three-dimensional field of human perception in real time, while the added objects are perceived as elements of real life. Thus, reality is supplemented by the introduction of virtual information into it [3]. Interactivity, accessibility, realism and innovativeness are some of the reasons for the increasing popularity and demand for augmented reality technology.

Several methods are used to generate virtual content using augmented reality technology. The first way to display virtual information is through a head mounted display (HMD). In this case, the user sees virtual information on the display screen, and the real environment through it [4]. Another way to work with augmented reality technology involves using a device with a camera (for example, a smartphone, tablet, or smart glasses) and special software. When you point the camera at an object, the program recognizes it using computer vision technology. Next, the device downloads the virtual information associated with this object and overlays it directly on the object in 3D. Thus, it turns out that the user sees both real and virtual information. The recognized objects are usually images with QR (quick response) codes, which are called markers. When the user moves or rotates the marker, the virtual image also moves and rotates. Unnecessary information disappears, and new information appears [5].

The development of augmented reality technology plays an important role in many areas of activity. Examples of the use of this technology in medicine [6, 7], industry [8, 9], tourism [10, 11] can be found.

Virtual reality (VR) is a simulation that creates a virtual yet realistic world using computer graphics. Moreover, the reproduced surrounding world is not static, but reacts to the user's input stream (gestures, verbal commands, etc.) [12]. Real-time interactivity is one of the essential distinguishing characteristics of virtual reality. This assumes that the computer is

able to detect the incoming stream from the user, interpret it and immediately change the virtual environment.

Virtual reality technology requires 3D head-mounted displays (virtual reality glasses), as well as stereoscopic hand and body tracking technologies and binaural sound. Thus, this technology can be defined as multisensory. Virtual environments, microworlds or virtual worlds are other equivalent names for VR technology.

Virtual reality is also increasingly used in such areas as scientific visualization, architecture, pilot training, medicine, entertainment [13, 14].

Technological basis

The virtual lab implementation is based on the Unity Game Engine [15]. Unity Game Engine is a cross-platform computer game development environment from Unity Technologies. It allows you to create virtual reality applications that run on personal computers, mobile devices with iOS and Android operating systems, and Internet applications. The Unity editor has a simple Drag&Drop interface, which is easy to configure, consisting of various windows, so you can debug the game directly in the editor. The engine supports two scripting languages: C# and JavaScript. Physical calculations are performed by the PhysX physics engine from NVIDIA.

The Vuforia library was chosen as a library for the implementation of augmented reality functions due to such qualities as cross-platform compatibility, the ability to work for free, tracking 3D objects, and visual search.

The Vuforia library makes it easy to scan targets with the built-in Vuforia Object Scanner. It is also possible to enable virtual buttons and map additional elements using OpenGL. Cross-platform allows you to work on different platforms, which means a wider audience coverage and ease of use of the program.

As a virtual reality device, the Leap Motion controller was chosen, designed to track the movements of hands and fingers in space and used for human-computer interaction. The device includes three infrared LEDs and two cameras, and its tracking principle is stereoscopy (the reflected light from the LEDs is visible from two different points of view, and the distance from the sensor is calculated accordingly). Thanks to the SDK libraries, you can get information about tracking both hands in the space above the device at a height of 15-60 cm. The library's routines can recognize both hands and transmit information about the location of each bone segment.

Results and discussion

Development of virtual laboratory work

When developing the virtual electronic laboratory, agile software development methodologies, computer modeling methods, and object-oriented programming were used.

A virtual electronic laboratory was developed, which includes practical and theoretical tasks from the high school physics curriculum, as well as a set of animations. Practical tasks are implemented in the form of separate applications that provide access to three-dimensional visualization of the studied processes using augmented and virtual reality technologies, as well as solutions to problems. A set of 3D animations is presented in the form of an electronic textbook.

Figure 1 shows a component diagram that describes the internal structure of the application. The start/input point label is highlighted in red, the main program components are highlighted in green, and the auxiliary modules are highlighted in yellow.

The starting point is the launch of the application itself. It consists of four main components: visualized practical tasks, visualized theoretical tasks implemented in the form of laboratory works, animation of physical processes, and test questions. There are also auxiliary modules that ensure the operation of the main ones. These are folders with shared three-dimensional models, program code, and prefabs – special elements that can be reused in different scenes, while allowing you to provide a single interface and logic. In addition, there are separate folders in which there are elements required in a separate task or laboratory work. Another module is a module for the operation of the Leap Motion controller, which allows you to control the virtual laboratory work and its elements with your own hands inside the virtual space.

Figure 2 shows the class diagram of the electronic virtual laboratory. It demonstrates the logic that ensures the operation and interaction during the execution of the application. The diagram presents the classes in the application and their relationships. The main components are the laboratory itself, the user interface, and the control controller inside the laboratory. According to these elements, there are the classes: UIController, ProblemController, LeapHandModelController, Leap HandModel Base, and Leap Hand Model. All of them are derived from MonoBehaviour, the base class in Unity. Three classes belong to Leap Motion and provide its logic and control.

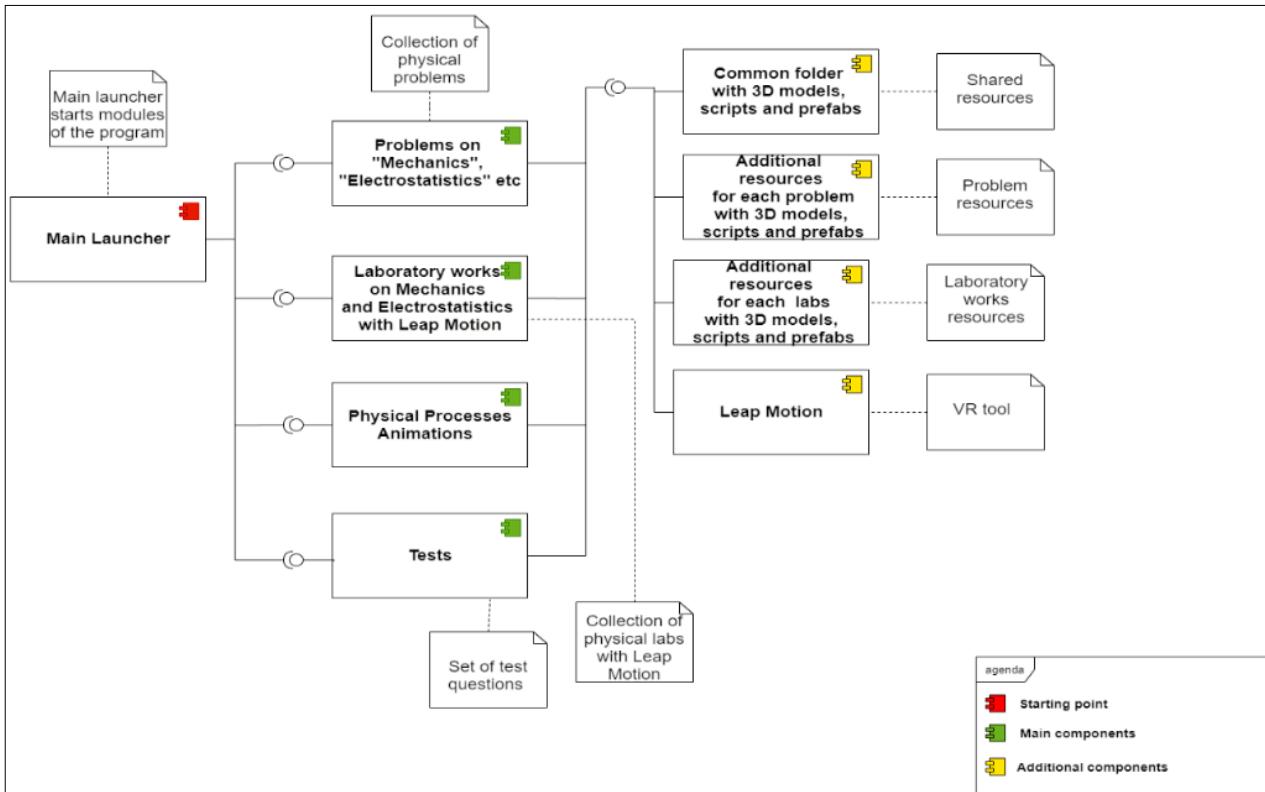


Figure 1 – Component Diagram

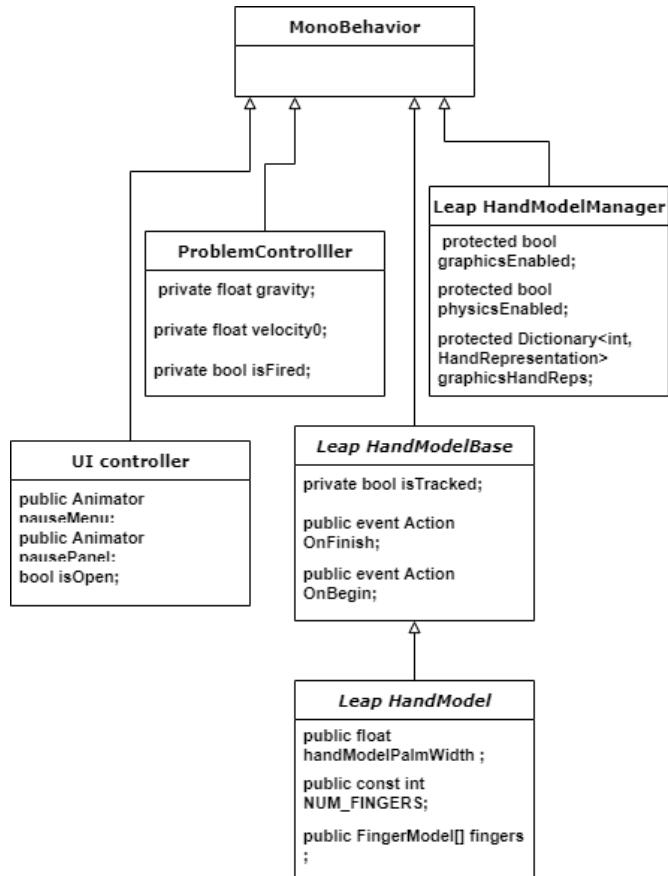


Figure 2 – Class diagram

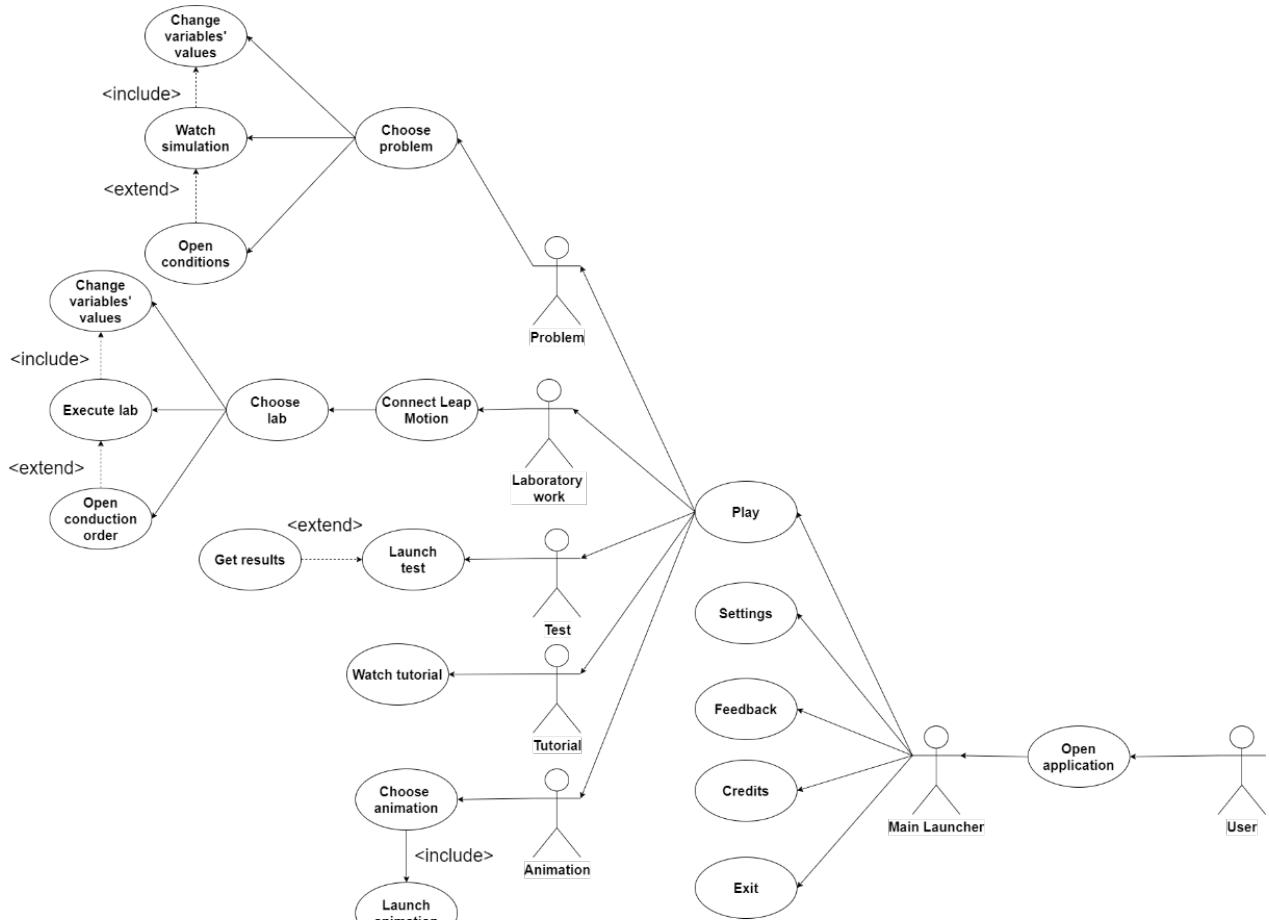
**Figure 3 – Action Diagram**

Figure 3 shows an action diagram. It reflects a user and the system as actors, with ellipses showing possible actions. So, the diagram shows the user who can launch the application, change settings, send feedback, learn about the development team, and exit the application. After launching the app, the user can choose to run a virtual lab, test, tutorial, animation, or task. Within each of these modules, certain possible actions are available, which can also be seen in the diagram.

Figure 4 shows the activity diagram, which reflects the logical relationship between the actions that the user performs inside the application.

As a result, the application provides the user with all the necessary information within the framework of the presented material, is completely safe, and demonstrates complex physical phenomena and concepts.

Conclusion

Thus, the use of new information and communication technologies in modern education opens new

opportunities and prospects for creating learning resources and tools at a qualitatively different level, especially in the current circumstances of the forced transition to distance learning.

This article provides an example of developing a software application for a virtual electronic laboratory with elements of augmented and virtual reality technologies, which includes a set of practical and theoretical tasks in physics in the form of laboratory works, as well as animations, and tests. All components of the virtual electronic laboratory are made in the form of separate modules with three-dimensional visualization of the studied processes and phenomena. The user documentation and the description of each laboratory work and the entire system are also provided by the authors. The developed virtual laboratory has been tested in the educational process.

The authors believe that the created virtual laboratory for the physics course meets the requirements of modernity and is effective in the study of this subject. Currently, we are constantly working on the development of new practical tasks and laboratory works for their integration into the laboratory.

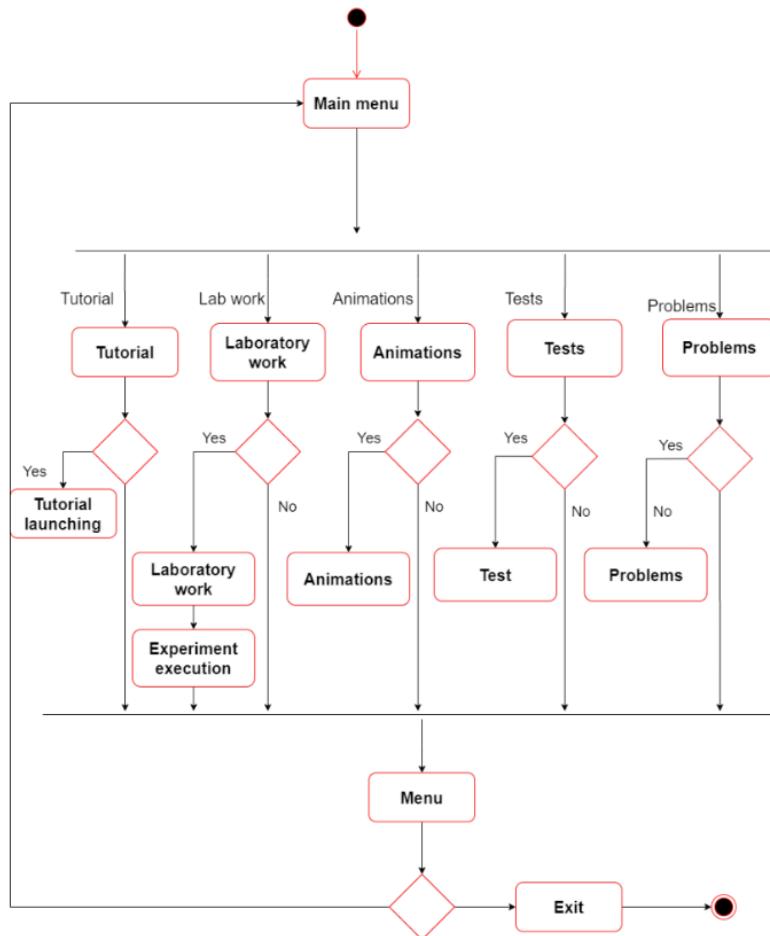


Figure 4 – Activity Diagram

Acknowledgment

The work was carried out with the financial support of the Committee of Science of the Min-

istry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan under the program of grant financing of scientific research for 2020-2022 years, grant №AP08857146.

References

- 1 Daineko Ye., Dmitriyev V., Ipalakova M. Using Virtual Laboratories in Teaching Natural Sciences: An Example of Physics // Computer Applications in Engineering Education. – 2017. – №25(1). – P. 39-47.
- 2 Daineko Y.A., Ipalakova M.T., Bolatov Zh.Zh. Employing Information Technologies Based on .NET XNA Framework for Developing a Virtual Physical Laboratory with Elements of 3D Computer Modeling // Programming and Computer Software. – 2017. – №43(3). – P. 161-171.
- 3 Milgram P., Kishino A.F. Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays // IEICE Transactions on Information and Systems. – 1994. – №E77-D (12). – P. 1321-1329.
- 4 Chi-Yin Yuen S., Yaoyuneyong G., Johnson, E. Augmented Reality: An Overview and Five Directions for AR in Education // Journal of Educational Technology Development and Exchange (JETDE). – 2011. – №4(1).
- 5 How augmented Reality works, Harvard Business Review, January 28, 2018 [Electronic resource]. – 2018. – URL: <https://hbr-russia.ru/innovatsii/tekhnologii/a24121> (accessed 14.10.2020).
- 6 Medical Graphics Research Group [Electronic resource]. – URL: <http://medical-graphics.org/projects/palpsim/> (accessed 14.10.2020).
- 7 MITK Pille [Electronic resource]. – URL: <https://www.electrictv.com/?p=13212> (accessed 01.10.2018).
- 8 Shelton B.E. Augmented reality and education // Current projects and the potential for classroom learning. New Horizons for Learning. – 2002. – №9(10).

- 9 Daubit Programmierung Service GmbH [Electronic resource]. – URL: <https://www.botta-design.de/> (accessed 14.10.2020).
- 10 HP Reveal [Electronic resource]. – URL: <https://www.hpreveal.com/> (accessed 01.10.2018).
- 11 Google Quest Visual [Electronic resource]. – URL: <http://questvisual.com/> (accessed 14.10.2020).
- 12 Burdea G., Coiffet P. Virtual Reality Technology. 1st ed. – New York: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- 13 Earnshaw R., Gigante M.A., Jones, H. Virtual Reality Systems. 1st ed. – New York: Routledge, 1993.
- 14 Riener R., Harders M. Virtual Reality in Medicine. – Springer-Verlag, 2012.
- 15 <https://unity3d.com/company>

References

- 1 Ye. Daineko, V. Dmitriyev, M. Ipalakova, Computer Applications in Engineering Education, 25(1), 39-47 (2017).
- 2 Y.A. Daineko, M.T. Ipalakova, Zh.Zh. Bolatov, Programming and Computer Software, 43(3), 161-171 (2017).
- 3 P. Milgram, A.F. Kishino, IEICE Transactions on Information and Systems, E77-D (12), 1321-1329 (1994).
- 4 S. Chi-Yin Yuen, G. Yaoyuneyong, E. Johnson, Journal of Educational Technology Development and Exchange (JETDE), 4(1) (2011).
- 5 <https://hbr-russia.ru/innovatsii/tehnologii/a24121> – How augmented Reality works, Harvard Business Review, January 28, 2018. (accessed 14.10.2020). (in Russ)
- 6 <http://medical-graphics.org/projects/palpsim/> – Medical Graphics Research Group (accessed 14.10.2020).
- 7 <https://www.electrictv.com/?p=13212> – MITK Pille, (accessed 01.10.2018).
- 8 B.E. Shelton, Current projects and the potential for classroom learning. New Horizons for Learning, 9(10) (2002).
- 9 <https://www.botta-design.de/> – Daubit Programmierung Service GmbH (accessed 14.10.2020).
- 10 <https://www.hpreveal.com/> – HP Reveal (accessed 01.10.2018).
- 11 <http://questvisual.com/> – Google Quest Visual (accessed 14.10.2020).
- 12 G. Burdea, P. Coiffet, Virtual Reality Technology. 1st ed., (New York, John Wiley & Sons Ltd, 2003).
- 13 R. Earnshaw, M.A. Gigante, H. Jones, Virtual Reality Systems. 1st ed., (New York, Routledge, 1993).
- 14 R. Riener, M. Harders, Virtual Reality in Medicine, (Springer-Verlag, 2012).
- 15 <https://unity3d.com/company> – The leading platform for creating interactive, real-time content.

МАЗМҰНЫ – 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
<i>Мырзакұл Ш.Р., Есентай М.Ж., Сотанова Г.А., Мырзакұл Т.Р.</i>		
Хорава-Лифшицтің $f(R)$ гравитациясындағы түткүр сұйықтықтың эволюциясы 4		
<i>Tulekov Ye., Morzabaev A.K., Makhamutov V.S.</i>		
The Forbush-decreases in cosmic ray fluxes and solar-proton events in july and september 2017 10		
<i>Алтайбаева А.Б., Ержанов К.К., Бауыржан Г.Б.</i>		
Термодинамика и геометротермодинамика черных дыр Рейсснера-Нордстрёма в многомерных моделях с степенной зависимостью 18		
2-бөлім Плазма физикасы	Section 2 Plasma Physics	Раздел 2 Физика плазмы
<i>Tazhen A.B., Dosbolayev M.K.</i>		
Measuring the self-generated magnetic field and the velocity of plasma flow in a pulsed plasma accelerator..... 30		
<i>Жұмадилов Р.Е., Утегенов А.У., Оразбаев С.А., Батрышев Д.Г.</i>		
Получение углеродных наночастиц в импульсно модулированной плазме ВЧ разряда..... 40		
3-бөлім Конденсирленген күй физикасы және материалтану проблемалары. Наноғылым	Section 3 Condensed Matter Physics and Materials Science Problems. Nanoscience	Раздел 3 Физика конденсированного состояния и проблемы материаловедения. Нанонаука
<i>Копырина А. В., Абдыр А. С.</i>		
Закономерности накопления и распределение водорода в покрытиях титана, сформированных на стальной подложке катодно-дуговым методом 48		
<i>Коршиков Е.С., Сапаргалиева Г.Б.</i>		
Исследование оптических свойств реконденсатов CCl_4 , полученных методом криоматричной изоляции 53		
4-бөлім Жоғары мектепте физиканы оқыту әдістемесі	Section 4 Methods of teaching high school physics	Раздел 4 Методика преподавания физики в высшей школе
<i>Daineko Ye.A., Ipalakova M.T., Tsoy D.D., Seitnur A.M.</i>		
The role of new information and communication technologies in modern education 63		