

Ж.А. Заурбекова<sup>1\*</sup>, С.К. Әскербеков<sup>1,2</sup>, А.А. Шаймерденов<sup>1,3</sup>,  
 А.М. Аханов<sup>3</sup>, Е.В. Чихрай<sup>1</sup>, Г. Кизане<sup>4</sup>, А.У. Төленова<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>2</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ.

<sup>3</sup>Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>4</sup>Латвия Университеті, Латвия, Рига қ.

<sup>5</sup>Satbayev University, Қазақстан, Алматы қ.

\*e-mail: zzha@mail.ru

## ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРЛАР БЛАНКЕТТЕРІНІҢ МАТЕРИАЛДАРЫНАН ГАЗ БӨЛҮДІ ЗЕРТТЕУ БОЙЫНША ӘДІСТЕМЕЛІК ЭКСПЕРИМЕНТТЕР

Жұмыс термоядролық реакторлар бланкеттерінің тритийгенерациялайтын материалдарымен сәулелендіру эксперименттерін жүргізу әдістемесін пысықтаумен байланысты проблемаға арналған. Эксперименттер ВВР-К реакторында (Алматы, Қазақстан) орналасқан литий керамикасынан тритийді бөлуді зерттеу үшін әзірленген қондырғыда жүргізілді. Реакторлық эксперименттерде литий керамикасының үлгілері орналастырылған арнайы сәулелендіретін ампулалық құрылғы жасалды. Сәулелендіру құрылғысының жалпы ұзындығы шамамен 5 м құрайтындығына байланысты және сәулелендіру кезінде үлгілер қысымды бақылау техникалық мүмкін емес құрылғының төменгі бөлігінде орнатылады, реактордан тыс әдістемелік эксперименттер жүргізілді, оның барысында зерттелетін үлгілер аймағынан қондырғыға газдардың ағынын масс-спектрометр саласында тіркелетін парциалды қысымдармен байланыстыратын калибрлеу коэффициенттері анықталды. Нейтрондық-физикалық, термофизикалық және вакуумдық есептеулердің нәтижелері ампуланың дамыған конструкциясымен сәулеленуді 773–1473 К температурада жүргізуге болатындығын және әзірленген қондырғы  $10^{-11}$  моль/с-тан жоғары зерттелген үлгілерде тритий мен гелийдің жұмыс істеу деңгейінде жүйеде газ ағынын тіркей алатындығын көрсетті.

**Түйін сөздер:** бланкет, термоядролық реактор, литий керамикасы, тритий, гелий.

Zh.A. Zaurbekova<sup>1\*</sup>, S.K. Askerbekov<sup>1,2</sup>, A.A. Shaimerdenov<sup>1,3</sup>, A.M. Akhanov<sup>3</sup>,  
 G. Kizane<sup>4</sup>, Y.V. Chikhray<sup>1</sup>, A.U. Tolonova<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, Nur-Sultan

<sup>3</sup>Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

<sup>4</sup>University of Latvia, Latvia, Riga

<sup>5</sup>Satbayev University, Kazakhstan, Almaty

\*e-mail: zzha@mail.ru

### Methodical experiments on the study of gas release from materials of thermonuclear reactor blankets

The work is devoted to the problem related to the development of methods for conducting irradiation experiments with tritium-generating materials of fusion reactor blanks. The experiments were carried out on a facility designed to study the release of tritium from lithium ceramics, which is located at the WWR-K reactor (Almaty, Kazakhstan). A special irradiation ampoule device was developed, in which samples of lithium ceramics are placed in reactor experiments. Due to the fact that the total length of the irradiation device is about 5 m and during irradiation, samples are installed in the lower part of the device, where pressure control is technically not possible, out-of-pile methodological experiments were conducted, during which calibration coefficients were determined that link gas flows from the area of investigated samples to the installation with partial pressures recorded in the mass spectrometer area. The results of neutron-physical, thermophysical and vacuum calculations showed that with the developed ampoule design, irradiation can be carried out at temperatures of 773–1473 K and that the developed installation can register the gas flow in the system at the operating level of tritium and helium in the studied samples above  $10^{-11}$  mol/s.

**Key words:** blanket, fusion reactor, lithium ceramics, tritium, helium.

Ж.А. Заурбекова<sup>1\*</sup>, С.К. Аскербекөв<sup>1,2</sup>, А.А. Шаймерденов<sup>1,3</sup>, А.М. Аханов<sup>3</sup>,  
Е.В. Чихрай<sup>1</sup>, Г. Кизане<sup>4</sup>, А.У. Тлленова<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>Евразийский национальный университет Л.Н. Гумилева, Казахстан, г. Нур-Султан

<sup>3</sup>Институт ядерной физики, Казахстан, г. Алматы

<sup>4</sup>Латвийский Университет, Латвия, г. Рига

<sup>5</sup>Satbayev University, Казахстан, г. Алматы

\*e-mail: zzha@mail.ru

### Методические эксперименты по изучению газовыделения из материалов бланкетов термоядерных реакторов

Работа посвящена проблеме, связанной с отработкой методики проведения облучательных экспериментов с тритийгенерирующими материалами бланкетов термоядерных реакторов. Эксперименты были проведены на установке, разработанной для исследования выделения трития из литиевой керамики, которая располагается на реакторе ВВР-К (Алматы, Казахстан). Было разработано специальное облучательное ампульное устройство, в которое размещаются образцы литиевой керамики в реакторных экспериментах. В связи с тем, что общая длина облучательного устройства составляет около 5 м и во время облучения образцы устанавливаются в нижней части устройства, где контроль давления технически невозможен, были проведены внереакторные методические эксперименты, в ходе которых были определены коэффициенты калибровки, которые связывают потоки газов из области исследуемых образцов в установку с парциальными давлениями, регистрируемыми в области масс-спектрометра. Результаты проведенных нейтронно-физических, теплофизических и вакуумных расчетов показали, что с разработанной конструкцией ампулы облучение можно будет проводить при температурах 773–1473 К и что разработанная установка может зарегистрировать поток газа в системе при уровне наработки трития и гелия в исследуемых образцах выше  $10^{-11}$  моль/с.

**Ключевые слова:** бланкет, термоядерный реактор, литиевая керамика, тритий, гелий.

### Кіріспе

Ядролық және термоядролық реакторлардың конструкциялық материалдарының сәулелендіру жағдайындағы және сутегі изотоптарымен өзара әрекеттесуі кезіндегі мінез-құлқын зерделеу, сондай-ақ осы факторлардың термоядролық реакторларда функционалдық ретінде пайдалану жоспарланып отырған материалдармен өзара әрекеттесуінің негізгі заңдылықтарын белгілеу бүгінгі таңда ғылыми қоғамдастық алдында тұрған маңызды және өзекті міндеттер болып табылады. Бұл материалдардың негізгі функциясы – термоядролық отынның құрамдас бөліктерінің бірі болып табылатын тритийді шығару мүмкіндігі [1-15].

2018 жылы ВВР-К реакторында ядролық және термоядролық реакторлар материалдарынан газ шығару процестерін зерттеуге мүмкіндік беретін қазіргі заманғы қондырғыны әзірлеу және құру басталды [16, 17]. Орнатудың схемасы және эксперименттік сәулелендіру құрылғысының оңтайлы конструкциясы жасалды. Сәулелендіру құрылғысының нейтрондық-физикалық және жылу-физикалық есептері, сондай-ақ вакуумдық жолдың әртүрлі геометрияларына арналған қондырғының вакуумдық есептері жүргізілді. Газ бөлуді тіркеу үшін

Stanford Research System компаниясының квадрупольді масс-спектрометрі қолданылады.

Сәулелендіру құрылғысының жалпы ұзындығы шамамен 5 м болғандықтан және сәулелендіру кезінде үлгілер қысымды бақылау техникалық мүмкін емес құрылғының төменгі бөлігінде орнатылады, реактордан тыс әдістемелік эксперименттер жүргізілді. Эксперименттердің мәні зерттелген үлгілер аймағынан газ ағындарын масс-спектрометр аймағында тіркелген ішінара қысымдармен байланыстыратын калибрлеу коэффициенттерін анықтау болды. Жүргізілген әдістемелік эксперименттер қондырғыны пайдалануға беру алдындағы маңызды кезең болып табылады және алынған нәтижелер реакторлық эксперименттер кезінде газ бөлуді дұрыс түсіндіру үшін қажет.

### Материал және әдістер.

*Ампуланың конструкциясын әзірлеу*

*Вакуумдық есептеулер*

Вакуумдық есептеулердің мақсаты жүйенің әртүрлі геометриялары мен тритийдің газ бөлу ағындарына арналған сәулелендіру құрылғысы мен вакуумдық жүйенің ұзындығы бойынша қысымдардың ауқымы мен таралуын бағалау ( $10^{-11}$ - $10^{-8}$  моль/с).

Құрылғының таңдалған есептік геометриясы ұзындығы 4 м, диаметрі 15 мм немесе 17,5 мм немесе 20 мм ампулалық құрылғыдан (АҚ), ұзындығы 4 метр және ішкі диаметрі 10 мм тот баспайтын болаттан жасалған шығу құбырынан және шығу құбырын (диаметрі 10 мм) ТМС кіріс фланецімен (100 мм) сызықтық түрде жұптастыратын ұзындығы 0,5 м жалғастырушы келте құбырдан тұратын жүйені ұсынды.

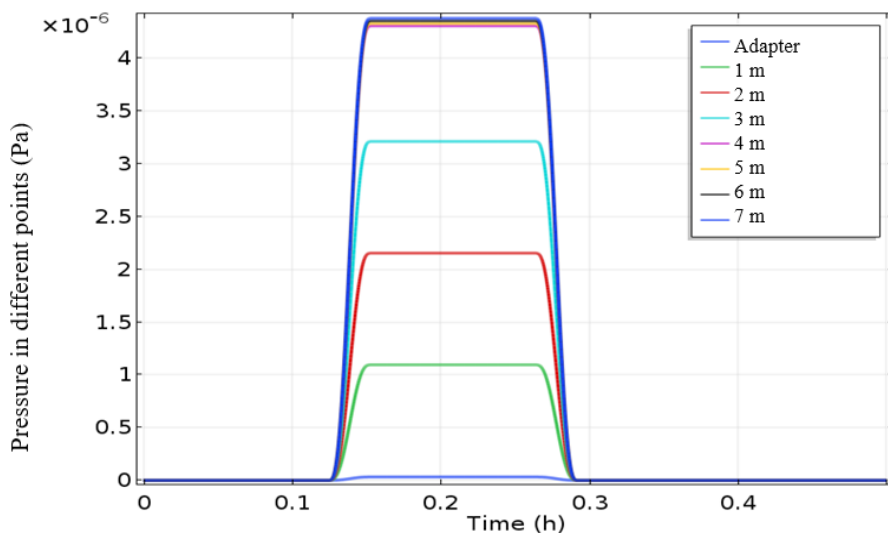
Есептеулер үшін 3 өлшемді ось-симметриялы модель қолданылды, оның бойымен барлық элементтер бір осьте орналасқан, ұзындығы 8,5 м, бұл есептеулердің дәлдігіне және алынған нәтижелердің жалпылығына әсер етпейді.

Есептеу міндеті құрылғының ішкі бетінің температурасының, газдың кіріс ағынының және вакуумдық сорғының сору жылдамдығының берілген мәндері үшін құрылғының жұмыс

процесінде бүкіл жүйенің ұзындығы бойымен сутегі (немесе басқа газ) концентрациясы мен қысымының таралуын есептеу болды.

Есептеу міндеті жүйенің жалпы бетін соңғы элементтерге бөлуге және қажетті G, P және n интегралдарын есептеуге дейін азаяды. Біздің жағдайда осы мақсатта Comsol Multiphysics инженерлік мәселелерді шешу жүйесі қолданылды [18].

Есептеу 0-1800 секунд (30 минут) уақыт аралығы үшін жүргізіледі. Алынған есептеу нәтижелерінің неғұрлым айқын болуы үшін модельде газдың кіріс ағыны импульстік сипатта болады және 500 секундтан 1000 секундқа дейін беріледі. Сорғыдан әр түрлі қашықтықта вакуумдық жүйеде сутегі қысымының өзгеруінің сипаттамалық тәуелділігі 1-суретте көрсетілген.



1-сурет – Ағынның импульсі  $10^{-9}$  моль/с болған кезде сорғыдан әртүрлі қашықтықта қысымның өзгеру динамикасы

Алынған тәуелділіктер эксперименттің физикалық көрінісіне сәйкес келетіні байқалады:

- Қондырғыға газ ағынын беру саласындағы ең көп қысым.

- Құбырлар арқылы қысымның сызықтық төмендеуі байқалады, ал қысымның түсу жылдамдығы кіші диаметрлі құбырда жоғары.

Қысымды бөлудің алынған мәндері, жалпы алғанда, жүйеде тритий мен гелий ағынын тіркеудің физикалық қабілеті зерттелетін үлгілердегі тритий мен гелийдің өндіріс деңгейлері үшін  $10^{-11}$  моль/с жоғары болатындығын көрсетеді.

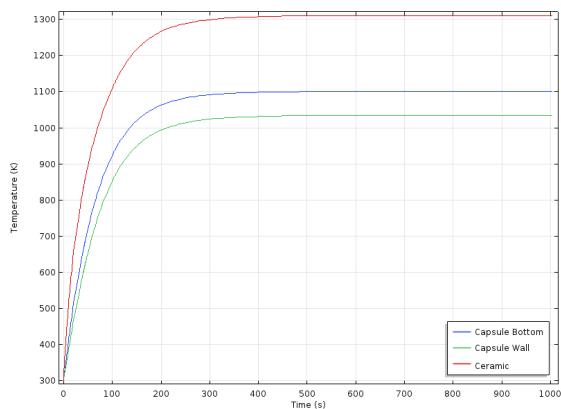
*Нейтрондық-физикалық және жылуфизикалық есептеулер*

Нейтрондық-физикалық есептеулер MCNP (Monte Carlo N-particle) компьютерлік бағдарламасын қолдану арқылы жүргізілді, онда нейтрондар мен басқа бөлшектердің қозғалыс траекториясын модельдеу үшін Монте-Карло әдісі қолданылады, яғни бұл кездейсоқ процестерді зерттеудің сандық әдісі [19, 20]. Есептеулерде нейтрондардың ENDF / B-VII заттармен өзара әрекеттесуіне арналған қималар кітапханасы пайдаланылды [21].

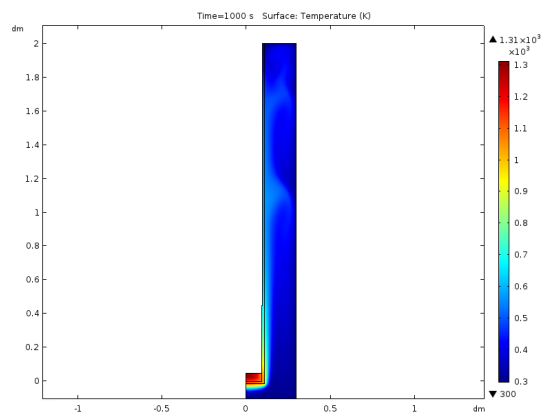
Тот баспайтын болаттан жасалған сәулелендіргіш капсулаға арналған ТЯР бридер-

лерінің әртүрлі материалдары бар қыздыру және температуралық өрістердің таралу динамикасының жылуфизикалық есептері жүргізілді: литий керамикасы [22]. Есептеулер кезінде

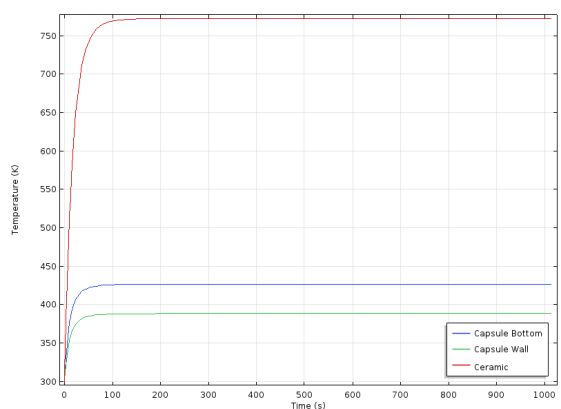
керамикада жылу шығыны  $82,3 \text{ Вт/см}^3$  және болатта  $4 \text{ Вт/см}^3$  құрайды деп қабылданды. Капсулаларды қыздыруды үлгілерсіз бөлек есептеді. Есептеу нәтижелері 2-суретте көрсетілген.



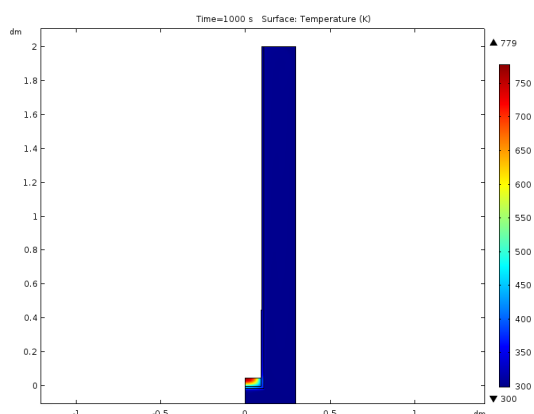
а) құрғақ арнада орналасқан керамикамен ампула температурасының өзгеруіне уақытша тәуелділік;



в) құрғақ арнадағы квази-тепе-тең күйдегі ампула бойынша температураның таралуы



б) суы бар арнада орналасқан керамикамен ампуланың температурасының өзгеруіне уақытша тәуелділік



г) суы бар арнадағы квази-тепе-тең күйдегі ампула бойынша температураның таралуы

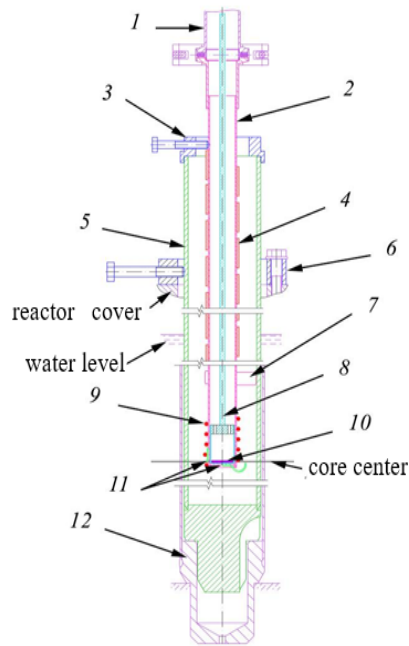
2-сурет – Сәулендіру кезінде литий керамикасы бар ампула бойынша температуралық өрістерді есептеу нәтижелері

Ампуланың ең жоғары температурасы  $573 \text{ K}$  (құрғақ арна үшін) және  $373 \text{ K}$  (суы бар арна үшін) аспайды – бұл тұтастай алғанда ТЯР материалдарымен реакторлық эксперименттерде зерттеудің төменгі температурасын анықтайды.

Керамиканың жеткілікті жоғары температурасы (барлық есептеулер үшін) ондағы энергия шығарудың үлкен мәндеріне және салыстырмалы түрде төмен жылу өткізгіштікке байланысты.

### Эксперименттік сәулендіру құрылғысын жасау

Алдын ала вакуумдық, нейтрондық-физикалық және термофизикалық есептеулер, ампулалық құрылғының материалдық құрамын бағалау негізінде ВВР-К зерттеу реакторының таңдалған эксперименттік арнасының барлық құрылымдық ерекшеліктерін ескере отырып, 3-суретте көрсетілген сәулендіру құрылғысының схемасы дайындалды.



**3-сурет** – Сәулелендіру құрылғысының схемасы.

- 1 – жұмыс блогына қосылу; 2 – эксперименттік ұяшық (ампула); 3 – жоғарғы орталық фланец;  
 4 – таспалы жылытқыш; 5 – эксперименталды арна (ЭА); 6 – ұстаушы ЭА; 7 – дистанционаторлар;  
 8- жүктеу капсуласы; 9 – термопара қыздырғышы; 10 – үлгілер; 11 – термопаралар; 12 – ығыстырғыш

Зерттелетін үлгілер жүктеу капсуласының (ЖК) ішіне, ал ол өз кезегінде сорылатын эксперименттік ұяшыққа орналастырылады. Қажетті температуралық режимді қамтамасыз ету үшін ампулалық құрылғы (АҚ) термопаралық жылытқышпен жабдықталған. Үлгі аймағындағы температураны өлшеу үшін ұсынылған схемаға сәйкес ХА типті термопаралар орнатылды.

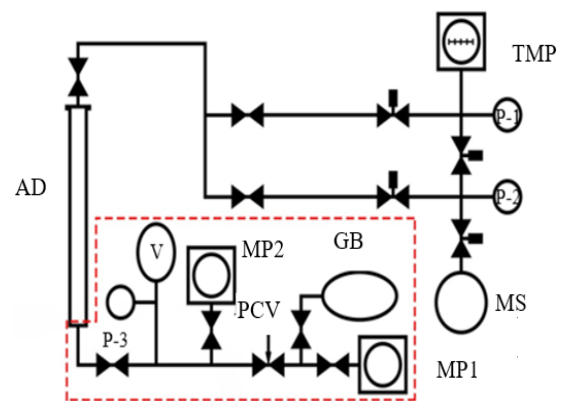
АҚ және ЖК бөлшектері 12Х18Н10Т тот баспайтын болаттан, ал эксперименталды арна (ЭА) САВ-1 алюминий қорытпасынан жасалған.

### Әдістемелік эксперименттер

Әдістемелік эксперименттерді жүргізудің мақсаты зерттелетін үлгілер аймағынан қондырғыға газ ағындарын масс-спектрометр аймағында тіркелген ішінара қысымдармен байланыстыратын калибрлеу коэффициенттерін анықтау болды. Осы калибрлеуден кейін газ қоспасы компоненттерінің абсолютті концентрациясын немесе абсолютті ішінара қысымын есептеуге болады.

Әдістемелік эксперимент схемасын іске асыру үшін қондырғының схемасына газ беру жүйесі қосылды, ол 4-суретте қызыл пунк-

тирмен көрсетілген. Сондай-ақ, реакторлық эксперименттерді жүргізу үшін ұсынылған геометрия мен АҚ-ның материалдық құрамына толық сәйкес келетін, бірақ АҚ арқылы газ ағынын ұйымдастыру мүмкіндігі үшін тесік қосып, ампуланың түбінде ДУ6 стандартты кіріс фланеці жасалды.



- AD – ампулалық құрылғы; TMP – турбомолекулярлық сорғы; MS – масс-спектрометр; газ беру жүйесі (MP – механикалық сорғы; PCV – пьезокерамикалық натекатель; GB – газы бар баллон; V – көлем; P – қысым датчигі).

**4-сурет** – Әдістемелік эксперименттер жүргізуге арналған қондырғының принциптік схемасы

Газ беру жүйесінің жұмыс принципі келесідей: пьезокерамикалық натекатель (PCV) екі жағынан механикалық сорғылармен (MP1-2) шамамен  $10^{-2}$  торр қысымға дейін сорылады, содан кейін PCV арқылы газы бар баллоннан (GB) зерттелетін газдың тұрақты ағыны ұйымдастырылады.

Әдістемелік эксперименттерді жүргізу схемасы келесідей болды:

– Зерттелетін үлгілер орналасатын аймақтағы сорғымен айдалатын ампулаға (реакторлық эксперимент кезінде) газ беріледі;

– Одан әрі масс-спектрометр қондырғыдағы газдың тепе-теңдік қысымын тіркейді;

– Осыдан кейін жеткізу камерасы сорғыдан бөлініп, осы камерадағы газ қысымының жоғарылауы тіркеледі;

– Масс-спектрометрдегі өлшенген қысымның белгілі мәндеріне және беру камерасындағы газ жиынтығының белгілі жылдамдығына сәйкес калибрлеу коэффициенттері анықталады.

Осылайша, эксперименттік ұяшық арқылы зерттелетін газ ағынының мәнін және масс-спектрометрдің көрсеткіштерін біле отырып, зерттелетін барлық газдар үшін калибрлеу коэффициенттері анықталады.

Бірінші кезеңде қондырғының жұмыс көлемін анықтау бойынша эксперимент жүргізілді.

Процедура келесідей болды:

– бүкіл жүйе  $10^{-6}$  торр қысымына дейін созылды;

– әрі қарай, қондырғыдағы барлық клапандар жабылды: осылайша, жұмыс камерасы (қондырғының өлшеу жолы) клапандарды әртүрлі көлемдерге бөлді;

– белгілі көлемде ( $V_1$ ) белгілі  $P_1$  газ қысымы пайда болды, содан кейін бұл көлем клапанмен кесілген қондырғы камерасының көрші көлеміне бөлінді: газдың жалпы қысымы  $P_2$  мәндеріне дейін төмендеді;

– осылайша, камераның жалпы көлемі дәйекті бөліну арқылы ұлғайтылды және қондырғының камералық көлемінің мәні (9) формула бойынша анықталды:

$$V_x = \frac{V_1(P_1 - P_2)}{P_2}, \quad (1)$$

мұндағы  $V_1$  – камераның көлемі;  $P_1 - V_1$  камерасындағы бастапқы қысым;  $P_2 - V_1$  көлемін  $V_x$  ашқаннан кейін  $V_1 + V_x$  камерасындағы қысым

Екінші кезең әдістемелік тәжірибелердің өздері болды.

## Нәтижелер және талдау

Барлығы калибрлеу бойынша бірнеше эксперименттер жүргізілді, олардың нәтижелері бір-біріне сәйкес келді. Ұсынылған экспериментте қондырғыға гелийдің, дейтерийдің және сутектің әр түрлі түсу режимдеріне арналған қондырғы камерасындағы газдар спектрлерінің өзгеруінің тәуелділігі туралы мәліметтер келтірілген. Сондай-ақ, сорғы клапанмен жабылған кезде беру камерасындағы қысымның өзгеруіне байланысты.

Біз 5-суретте көрсетілген дейтерий газымен қондырғыны калибрлеу бойынша эксперимент кезеңінің стандартты режимін суреттейміз (эксперименттің уақыт аралығы 11000 с-тан 12500 с-қа дейін таңдалды).

Ыңғайлы болу үшін кесте бірнеше аймаққа бөлінеді. А аймағында эксперимент кезеңі ұсынылған, онда тұрақты газ ағынымен дейтерийді беру кезінде қондырғыдағы газ құрамын өлшеу жүргізіледі. Суреттен камерадағы гелийдің қысымы үнемі болатындығын көруге болады.

В аймағы – бұл эксперимент кезеңі, онда коректендіру камерасы сорғыдан ажыратылады және сәйкесінше орнату камерасында дейтерий қысымының төмендеуі байқалады, ал беру камерасында дейтерий қысымының жоғарылауы байқалады. Камерадағы дейтерий қысымының өсуі сызықтық болады деп күтілуде: осы сызықтық тәуелділіктің нәтижелері бойынша жүйеге кіретін дейтерий ағыны одан әрі бағаланады.

С аймағы – газ беру камерасы айдауға ашылады және жиналған газ одан айдалады, тиісінше қондырғы камерасындағы дейтерий ағынының А аймағындағы қысымға тең стационарлық мәнге дейін өсуі байқалады.

Д аймағы – натекатель арқылы қондырғы камерасына жаңа ағын орнатылады (бұл жағдайда ағын А-С аудандарындағы ағынға қарағанда үлкен), бұл жүйеде дейтерий қысымының кейбір жаңа стационарлық мәнге дейін өсуіне әкеледі.

Е аймағы – жоғарыда сипатталған В аймағына ұқсас эксперимент кезеңі, онда газ беру камерасы сорғыдан ажыратылады.

Осылайша, қондырғы камерасына берілетін әртүрлі газдар үшін эксперименттер жүргізіледі, ол арқылы камераға газ ағындарының стационарлық мәндері және масс-спектрометрмен тіркелген оларға сәйкес келетін стационарлық парциалды қысым анықталады.

Калибрлеу коэффициенттері (моль/(Па·с)) мынадай формула бойынша есептеледі:

$$K = \frac{dv}{dt} \cdot P_{MS} \quad (2)$$

мұндағы  $\frac{dv}{dt}$

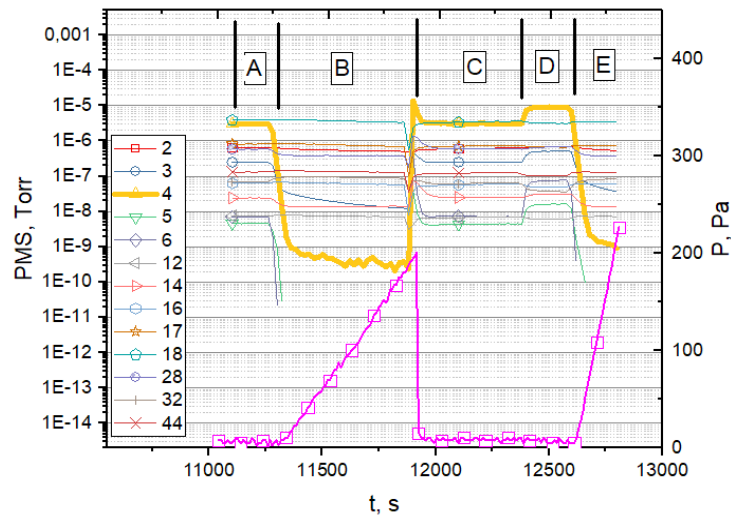
– қондырғыдағы газ ағыны;  $P_{MS}$  – масс-спектрометрде (Па) тіркелетін қысым.

Жүйеге газ ағынының мәндері келесі формула бойынша бағаланады

$$\frac{dv}{dt} = \frac{V}{RT} \left( \frac{dP}{dt} \right) \quad (3)$$

мұндағы  $V$  – әдістемелік эксперименттерде қондырғыдан ажыратылатын газ беру камерасының көлемі ( $m^3$ );  $R$  – әмбебап газ тұрақтысы;  $T$  – беру камерасындағы газдың температурасы (камера қабырғаларының температурасына тең қабылданады),  $K$ ;  $\frac{dP}{dt}$  беру камерасындағы газ қысымының жоғарылауының сызықтық жылдамдығы (Па/с).

Алынған калибрлеу коэффициенттері 1-кестеде келтірілген, олар қондырғы камерасындағы ағындардың әртүрлі деңгейлері үшін жақсы сәйкес келді.



5-сурет – Қондырғы камерасындағы дейтерий ағынын калибрлеу бойынша эксперимент кезеңі

1-кесте – Әр түрлі газдар үшін калибрлеу коэффициенттері (қондырғыға ағындардың деңгейі  $\sim (10^{-8}-10^{-10}$  моль/с)

Изотоп	$H_2$	$D_2$	He
Калибрлеу коэффициенті, моль/(Па·с)	$8,05 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$2,94 \cdot 10^{-5}$

Дейтерий мен сутектің калибрлеу коэффициенттерінің мәндері жақын болды, ал гелий бойынша калибрлеу коэффициенті бірнеше есе жоғары болды (гелий бойынша RGA-100 масс-спектрометрінің төмен сезімталдығы оның жоғары иондану әлеуетімен байланысты).

### Қорытынды

Осылайша, атқарылған жұмыстардың нәтижесінде мыналар алынды:

– ЯР және ТЯР материалдарынан газ бөлуді тіркеу бойынша қондырғы әзірленді және құрылды;

– ВВР-К реакторының қолда бар эксперименттік мүмкіндіктерін, реакторішілік эксперименттер жүргізу тәжірибесін және ядролық және термоядролық энергетиканы дамыту трендтерін ескере отырып, эксперименттік сәулелендіру құрылғысының конструкциясы әзірленді;

– нейтрондық-физикалық және термофизикалық есептеулер жүргізілді және олардың көмегімен тот баспайтын болаттан жасалған сәулелендіру ампулалары үшін қыздыру және температуралық өрістердің таралу динамикасының уақытша тәуелділіктері алынды, олар ампуланың дамыған конструкциясымен сәуле-

ленуді 773-1473 К температурада жүргізуге болатындығын көрсетті;

– вакуумдық трактінің әртүрлі геометриялары үшін және ТЯР материалдарының әртүрлі газ бөлу ағындары үшін қондырғы камерасындағы қысымның таралуының вакуумдық есептері жүргізілді. Әзірленген қондырғы тритий мен гелий ағынын жүйеде тритий мен гелийдің жұмыс деңгейі  $10^{-11}$  моль/с-тан жоғары зерттелген үлгілерде тіркей алатындығын көрсетті;

– ТЯР материалдарын сынау үшін әзірленген реакторлық ампулалық құрылғы дайындалды, оның көмегімен газ бөлуді зерттеу бойынша әдістемелік эксперименттер жүргізілді;

– реактордан тыс әдістемелік эксперименттер жүргізілді, оның барысында зерттелетін үлгілер аймағынан қондырғыға газдардың ағынын масс-спектрометр саласында тіркелетін парциалды қысымдармен байланыстыратын калибрлеу коэффициенттері анықталды. Эксперименттердің репродуктивтілігі жоғары, сондықтан калибровканың белгілі бір коэффициенттері сенімді деп қорытынды жасауға болады.

#### АЛҒЫС

Жұмыс ҚР Білім және ғылым министрлігінің қолдауымен № AP08856623 грант аясында орындалды.

#### Әдебиеттер

- 1 Тажибаева И.Л. Процессы переноса водорода в конструкционных материалах в поле ионизирующего излучения: (автореферат дис. доктора физико-математических наук: 01.04.07.). – Алматы, 1997. – 47 с.: ил.
- 2 Кульсартов Т.В. Методика и аппаратное обеспечение проведения длительных реакторных экспериментов по исследованию выделения трития из материалов твердотельных бланкетов ТЯР (автореф.дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.01: защищена 24.04.10; утв. 04.05.10). – Алматы, 2010. – 119 с.
- 3 Tazhibayeva I.L., et al. Reactor studies of hydrogen isotopes interaction with lithium CPS using dynamic sorption technique // *Fusion Engineering and Design*. – 2019. – Vol. 146. – Part A. – P. 402-405.
- 4 Kulsartov T., et al. Investigation of hydrogen isotopes interaction with lithium CPS under reactor irradiation // *Fusion Engineering and Design*. – 2017. – Vol. 124. – P. 324-327.
- 5 Kulsartov T., et al. Study of tritium and helium generation and release from lead-lithium eutectics Li15. 7Pb under neutron irradiation // *Fusion Engineering and Design*. – 2019. – Vol. 146. – P. 1317-1320.
- 6 Tritium: Fuel of Fusion Reactors. Ed. Tanabe T. – Springer, 2017.
- 7 Zmitko M., et al. Development and qualification of functional materials for the European HCPB TBM // *Fusion Engineering and Design*. – 2018. – Vol. 136. – P. 1376-1385.
- 8 Guangming Zhou, Francisco Hernández, Lorenzo V. Boccaccini, Hongli Chen and Minyou Ye. Preliminary structural analysis of the new HCPB blanket for EU DEMO reactor // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – Vol. 41. – Iss. 17. – P. 7053-7058.
- 9 Guangming Zhou, Francisco Hernández, Lorenzo V. Boccaccini, Hongli Chen and Minyou Ye. Preliminary steady state and transient thermal analysis of the new HCPB blanket for EU DEMO reactor // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – Vol. 41. – Iss. 17. – P. 7047-7052.
- 10 Qiang Qi, Jing Wang, Maoqiao Xiang, Yingchun Zhang, Shouxi Gu and Guang-Nan Luo. Mechanism of vacuum-annealing defects and its effect on release behavior of hydrogen isotopes in Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – Vol. 43. – Iss. 27. – P. 12295-12301.
- 11 Zhai, Youwen, et al. Characterization of tritium breeding ceramic pebbles prepared by melt spraying // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2020. – Vol. 40. – Iss. 4. – P. 1602-1612.
- 12 Gu, Shouxi, et al. Mechanical strength stability of tritium breeding materials under high temperature deuterium conditions // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46. – Iss. 1. – P. 1195-1202.
- 13 Zhou, Qilai, et al. Release kinetics of tritium generation in neutron irradiated biphasic Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>-Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> ceramic breeder // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 522. – P. 286-293.
- 14 Rubel, Marek. Fusion Neutrons: Tritium Breeding and Impact on Wall Materials and Components of Diagnostic Systems // *Journal of Fusion Energy*. – 2019. – Vol. 38. – Iss. 3-4. – P. 315-329.
- 15 Gu, Shouxi, et al. The effects of irradiation and high temperature on chemical states in Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol. 44. – Iss. 60. – P. 32151-32157.
- 16 Шаймерденов А.А. и др. Экспериментальная база реактора ВВР-К для исследования выхода трития из материалов при облучении / Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Накипов Д.А., Кенжин Е.А., Чихрай Е.В., Заурбекова Ж.А., Толенова А.У., Нестеров Е.А., Кизанэ Г. // *Вестник НЯЦ РК*. – 2020. – Вып. 1. – С. 104-111.
- 17 Shaimerdenov, A. et al. The WWR-K reactor experimental base for studies of the tritium release from materials under irradiation // *Fusion Science and Technology*. – 2020. – Vol. 76. – Iss. 3. – P. 304-313.
- 18 COMSOL Multiphysics® www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- 19 MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. – Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987, 2008.
- 20 X-5 Monte Carlo Team, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 – Volume II: User's Guide, Los Alamos National Laboratory report LA-CP-03-0245 (April 2003, revised 2/1/2008).



21 Chadwick M.B. ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data /M. Herman, P. Obložinský, M.E. Dunn, Y. Danon, A.C. // Nucl. Data Sheets.– 2011.– Vol. 112.– P. 2887.

22 Чихрай Е.В., Аскербеков С.К., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Аханов А.М., Кенжин Е.А., Кабулбек Е.Б. Теплофизические расчеты реакторной ампулы для исследования газовой выделенности из литийсодержащих материалов при проведении экспериментов на реакторе ВВР-К // Вестник НЯЦ РК.– Вып.1 (77).– 2019.– С. 52-59.

### References

- 1 I.L. Tazhibaeva, Abstract of the thesis. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, (Almaty, 1997) 47 p. (In Russ).
- 2 T.V. Kulsartov, Abstract of the thesis. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. (Almaty, 2010) 25 p. (In Russ).
- 3 I.L. Tazhibayeva, et al., Fusion Engineering and Design 146, A, 402-405 (2019).
- 4 T. Kulsartov, et al., Fusion Engineering and Design 124, 324-327 (2017).
- 5 T. Kulsartov, et al., Fusion Engineering and Design 146, 1317-1320 (2019).
- 6 T. Tanabe, (Ed.). Tritium: Fuel of Fusion Reactors (2017). <https://doi.org/10.1007/978-4-431-56460-7>.
- 7 M. Zmitko, et al., Fusion Engineering and Design 136, 1376-1385 (2018).
- 8 Guangming Zhou, Francisco Hernández, Lorenzo V. Boccaccini, Hongli Chen and Minyou Ye, International Journal of Hydrogen Energy 41, 17, 7053-7058 (2016).
- 9 Guangming Zhou, Francisco Hernández, Lorenzo V. Boccaccini, Hongli Chen and Minyou Ye, International Journal of Hydrogen Energy 41, 17, 7047-7052 (2016).
- 10 Qiang Qi, Jing Wang, Maoqiao Xiang, Yingchun Zhang, Shouxi Gu and Guang-Nan Luo, International Journal of Hydrogen Energy 43, 27, 12295-12301 (2018)..
- 11 Youwen Zhai, et al., Journal of the European Ceramic Society 40, 4, 1602-1612 (2020).
- 12 Shouxi Gu, et al., Ceramics International 46, 1, 1195-1202 (2020).
- 13 Qilai Zhou, et al., Journal of Nuclear Materials 522, 286-293 (2019).
- 14 Marek Rubel, Journal of Fusion Energy 38, 3-4, 315-329 (2019).
- 15 Shouxi Gu, et al., International Journal of Hydrogen Energy 44, 60, 32151-32157 (2019).
- 16 A.A. Shaimerdenov, Sh.Kh. Gizatulin, D.A. Nakipov, Ye.A. Kenzhin, Ye.V. Chikhray, Zh.A. Zaurbekova, A.U. Tolenova, E.A. Nesterov and G. Kizane, Bulletin of the NNC RK 1, 104-111 (2020). (In Russ).
- 17 Shaimerdenov, A. et al., Fusion Science and Technology 76, 3, 304-313 (2020).
- 18 COMSOL Multiphysics® [www.comsol.com](http://www.comsol.com). COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- 19 MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. – Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987, 2008.
- 20 X-5 Monte Carlo Team, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 – Volume II: User’s Guide, Los Alamos National Laboratory report LA-CP-03-0245 (April 2003, revised 2/1 / 2008).
- 21 M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, M.E. Dunn and Y. Danon, Nucl. Data Sheets 112, 2887 (2011).
- 22 Ye.V. Chikhray, S.K. Askerbekov, A.A. Shaimerdenov, Sh.Kh. Gizatulin, A.M. Akhanov, Ye.A. Kenzhin and E.B. Kabulbek, Bulletin of the NNC RK 1, 77, 52-59 (2019). (In Russ).