

УДК 621.039.531

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ РЕАКТОРНОЙ АМПУЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РЕАКТОРЕ ВВР-К

¹⁾ Чихрай Е.В., ^{1,2)} Аскербеков С.К., ²⁾ Шаймерденов А.А., ²⁾ Гизатулин Ш.Х.,
²⁾ Аханов А.М., ²⁾ Кенжин Е.А., ³⁾ Кабулбек Е.Б.

¹⁾ НИИЭТФ КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²⁾ РГП ИЯФ МЭ РК, Алматы, Казахстан

³⁾ КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

В данной статье представлен один из этапов работ по реализации проекта создания установки для длительных испытаний материалов ТЯР на реакторе ВВР-К. В частности, приведены данные теплофизических расчетов облучательной ампулы из нержавеющей стали, содержащей различные материалы бридеров ТЯР: литиевую керамику и свинцово-литиевую эвтектику.

Для расчетов была использована 3-х мерная осесимметричная модель, по которой все элементы находятся на одной оси.

Для моделирования тепломассопереноса использовался мультифизический модуль *Nonisothermal Flow*, интегрирующий в себе субмодули *Heat Transfer in Fluids* и *Laminar Flow* для расчета теплопереноса в металле ампулы и в потоке воздуха, контактирующего с поверхностью ампулы, и для расчета распределения скоростей и давления в потоке, соответственно.

Была оценена динамика нагрева и распределение температурных полей по ампуле на основе чего сделаны выводы о параметрах облучательного эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

Использование трития в термоядерных установках, помимо вопросов радиоэкологической безопасности, ставит вопросы его наработки, которые планируется решать с помощью самого термоядерного реактора (ТЯР). Поэтому каждая проектируемая термоядерная энергетическая установка содержит в своей конструкции систему генерации трития, т.н. бридерный бланкет. Почти во всех разрабатываемых бридерных бланкетах в качестве тритий воспроизводящего материала используются материалы, содержащие литий. В результате ядерной реакции ${}^6\text{Li}$ с нейтроном будет нарабатываться тритий, который после извлечения из системы генерации (бридерного бланкета) будет поступать в термоядерный реактор в качестве топлива [1–4].

Тематика материаловедческих исследований в области ядерных и термоядерных установок является традиционной для казахстанской науки [5, 6]: на установках Института атомной энергии (ИАЭ) и Института ядерной физики (ИЯФ) в частности, на реакторах ИВГ1.М и ВВР-К были исследованы множество конструкционных и функциональных материалов для будущих ЯР и ТЯР [7–12].

Создание на реакторе ВВР-К установки, которая позволит исследовать процессы газовыделения из материалов ЯР и ТЯР, расширит спектр экспериментальных возможностей реактора.

В настоящей работе представлен очередной этап работ по реализации проекта создания установки для испытаний материалов ТЯР на реакторе ВВР-К методом вакуумной экстракции.

МОДЕЛЬ

На рисунке 1 приведена расчетная геометрия облучательной ампулы с расположением грузочной капсулы с образцами на дне. Капсула из нержавеющей стали марки 12X18H10T содержит различные материалы бридеров ТЯР: литиевую керамику ($\text{LiSiO}_4 + 25\%\text{Li}_2\text{TiO}_3$) или свинцово-литиевую эвтектику (Pb83Li17).

В расчетах полагалось, что тепловыделение в керамике равно $82,3 \text{ Вт/см}^3$, в свинцово-литиевой эвтектике – $16,8 \text{ Вт/см}^3$, в стали – 4 Вт/см^3 .

Энерговыделение оценивалось на основе нейтронно-физических расчетов, выполненных с применением компьютерной программы MCNP (*Monte Carlo N-particle*).

В расчетах полагалось, что капсула охлаждается свободным конвекционным потоком воздуха в канале и теплоотдачей излучением, внутренняя часть капсул находится в вакууме. Расчеты проводились для нескольких значений степени черноты стали, температура внешней стенки канала была принята равной 300 К, поток воздуха в канале описывался как ламинарный. Отдельно был проведен расчет при предположении, что ампула находится в воде.

Для расчетов была использована 3-х мерная осесимметричная модель, по которой все элементы находятся на одной оси.

Для моделирования тепломассопереноса использован мультифизический модуль *Nonisothermal Flow*, интегрирующий в себе субмодули *Heat Transfer in Fluids* и *Laminar Flow* для расчета теплопереноса в потоке воздуха, контактирующего с поверхностью

капсулы, и для расчета распределение скоростей и давления в потоке, соответственно.

Модуль *Heat Transfer in Fluids interface* моделирует процессы, описываемые уравнением:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (1)$$

где: ρ – плотность (кг/м³); C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении (Дж/(кг·К)); T – абсолютная температура (К); $\mathbf{u}$ – вектор скорости (м/с) (для твердотельных доменов $\mathbf{u}=0$); $\mathbf{q}$ – вектор потока тепла теплопроводности и излучения (Вт/м²); Q – источник тепла (Вт/м³).

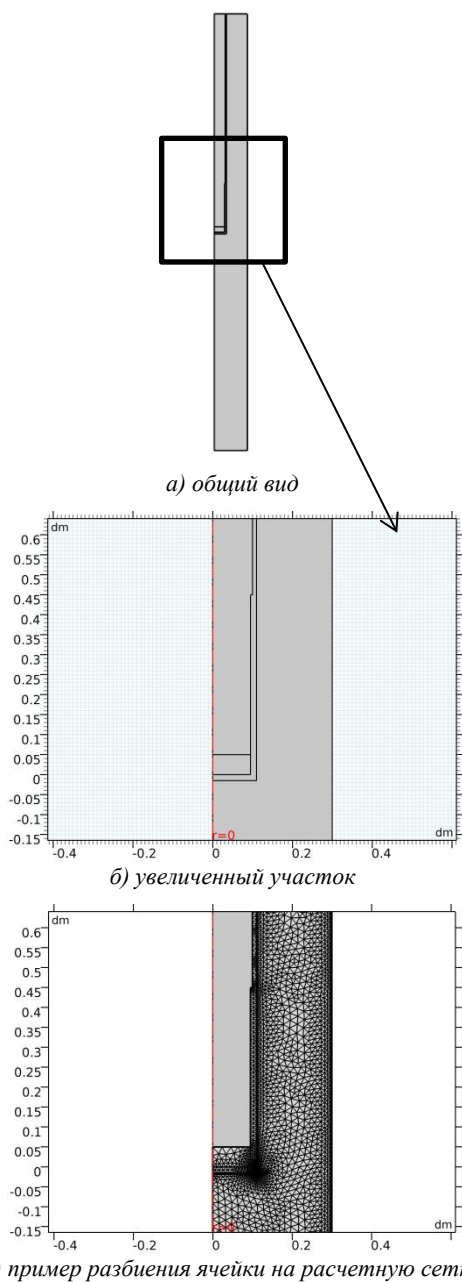


Рисунок 1. Расчетная геометрия облучательной ампулы с расположением образцов на дне ампулы

Модуль *Laminar Flow* моделирует ламинарный поток слабо сжимаемого воздуха, который описывается уравнением Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0 \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \\ &+ \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}] + \mathbf{F} + \rho \cdot \mathbf{g} \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где: p – давление (Па); $\mathbf{F}$ – вектор объемной силы (Н/м³); $\mathbf{I}$ – безразмерный тензор неоднородности динамической вязкости; $\mathbf{g}$ – вектор ускорения гравитации (м²/с); μ – динамическая вязкость (Па·с).

Одновременно рассчитывались температура, скорость течения и давление воздуха, охлаждающего ампулу. Рассчитана динамика изменения температуры дна капсулы, ее стенки в районе расположения исследуемого образца и в самом образце.

При расчетах керамика представлена как пористая среда, с объемной долей керамики 0,4, что соответствует расчетным литературным данным для запылки шариками диаметром 0,5 мм.

РАСЧЕТЫ

На рисунке 2 приведены результаты расчета нагрева ампулы без образцов (отключено тепловыделение из керамики).

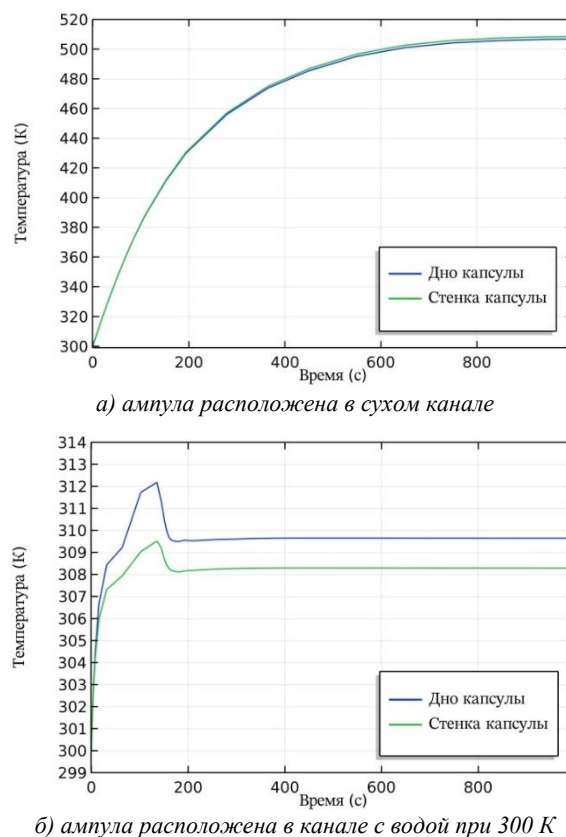


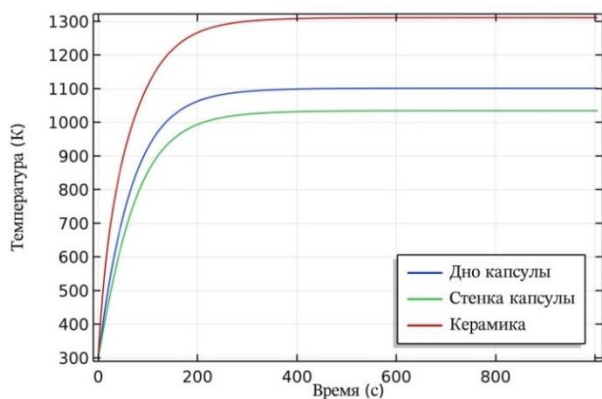
Рисунок 2. Результаты расчета температуры ампулы без образцов во время облучения

Как видно из рисунка, максимальная температура ампулы составляет не более 573 К (для сухого канала) и не более 373 К (для канала с водой) – что, в целом, определяет нижнюю температуру исследования в реакторных экспериментах с материалами ТЯР.

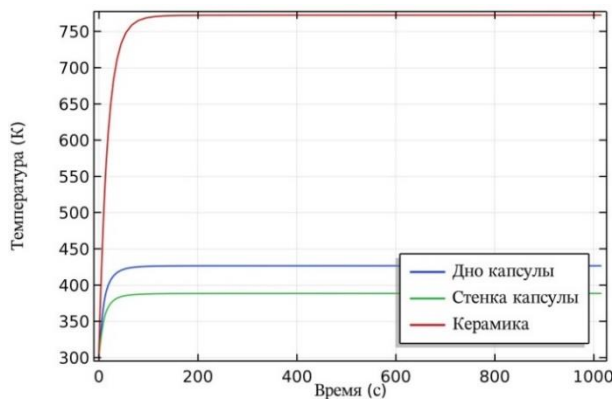
На рисунках 3 и 4 приведены результаты расчета нагрева ампулы с литиевой керамикой и свинцово-литиевой эвтектикой соответственно.

Максимальная температура литиевой керамики в сухом канале оказалась равна ~1300 К и в водном канале ~773 К.

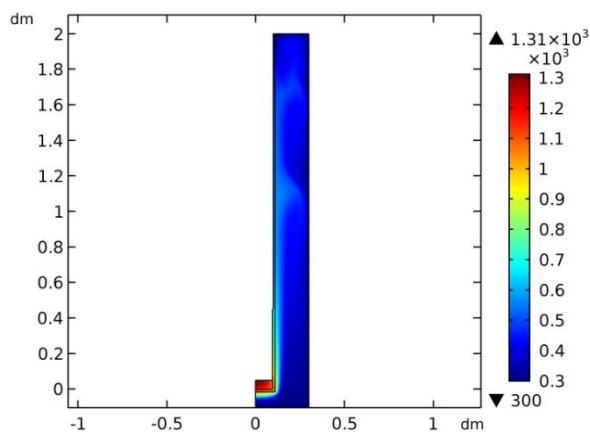
Максимальная температура свинцово-литиевой эвтектики в сухом канале ~723 К и в водном канале ~350 К.



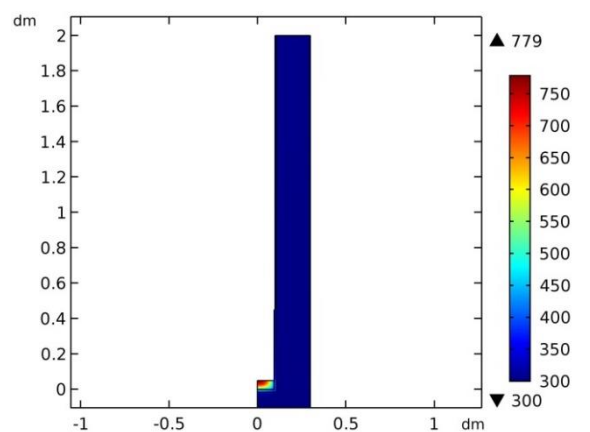
а) временная зависимость изменения температуры ампулы с керамикой, расположенной в сухом канале



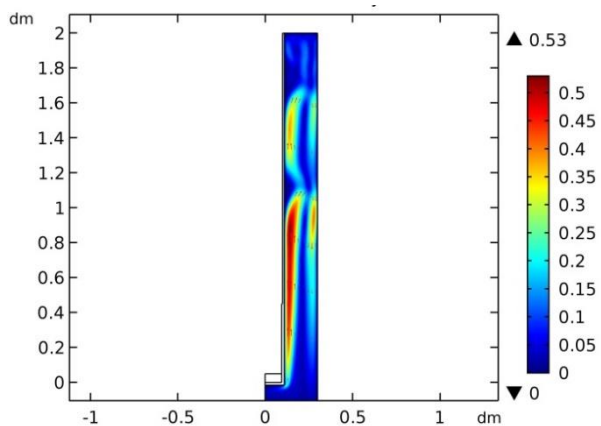
б) временная зависимость изменения температуры ампулы с керамикой, расположенной в канале с водой



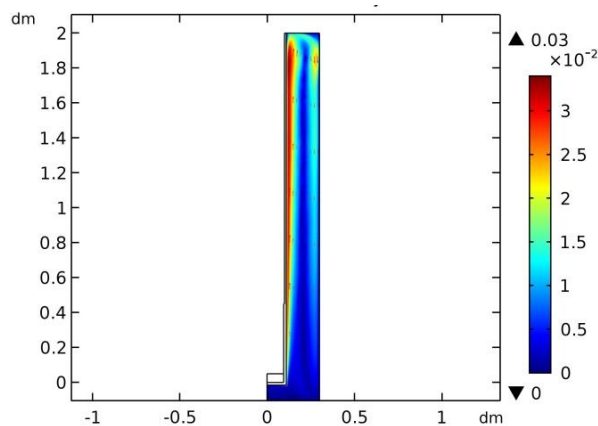
в) распределение температуры по ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале



г) распределение температуры по ампуле в квазиравновесном состоянии в канале с водой

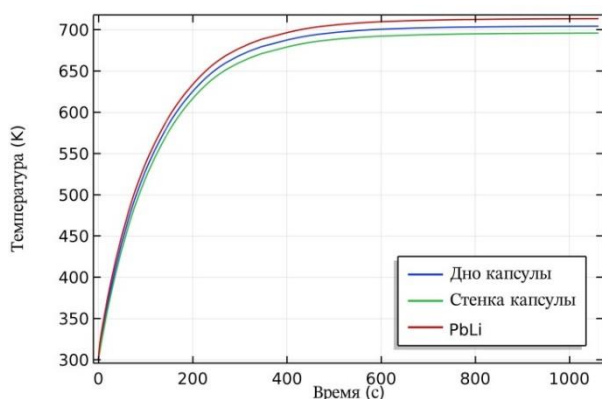


д) поле скоростей конвективного потока газа в ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале

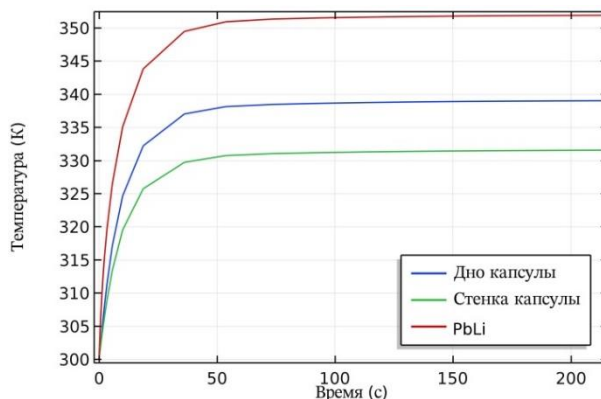


е) поле скоростей конвективного потока газа в ампуле в квазиравновесном состоянии в канале с водой

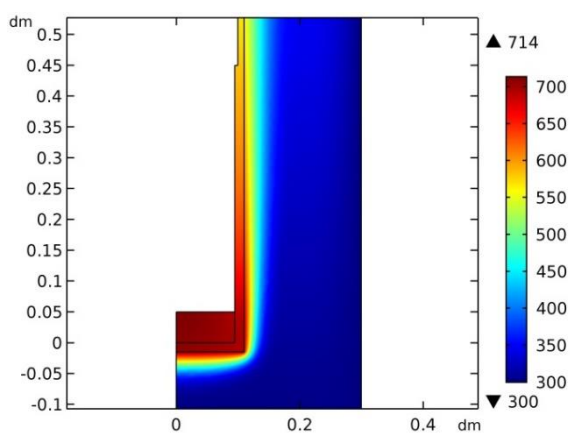
Рисунок 3. Результаты расчета температурных полей по ампуле с керамикой во время облучения



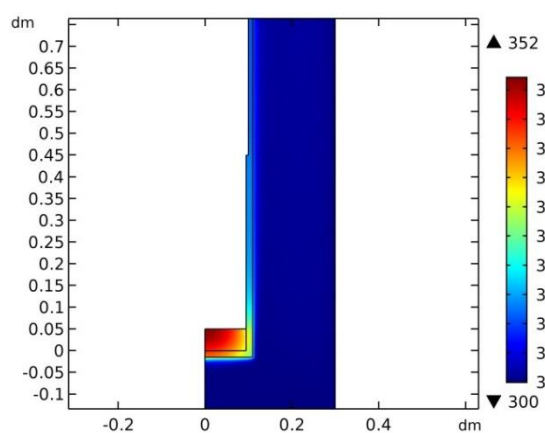
а) временная зависимость изменения температуры ампулы с эвтектикой, расположенной в сухом канале



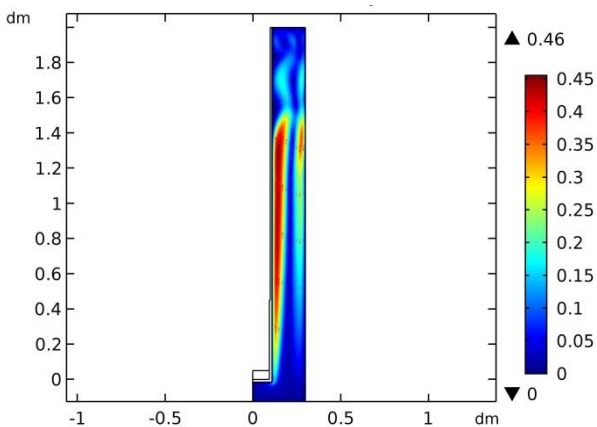
б) временная зависимость изменения температуры ампулы с эвтектикой, расположенной в канале с водой



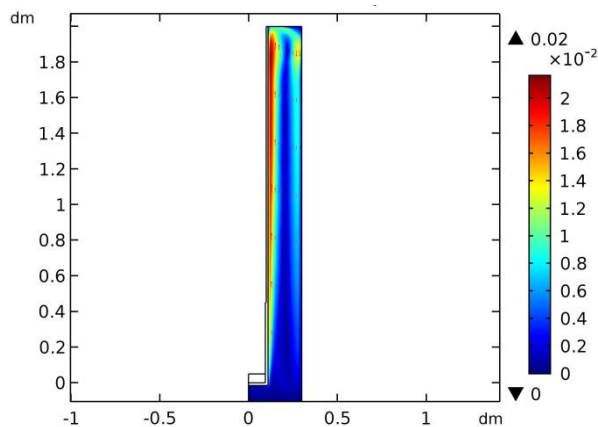
в) распределение температуры по ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале



г) распределение температуры по ампуле в квазиравновесном состоянии в канале с водой

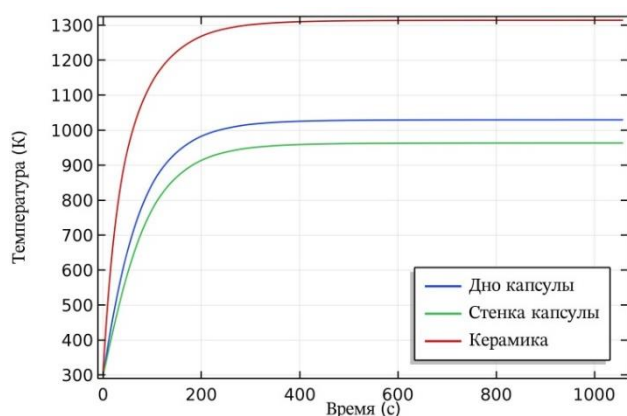


д) поле скоростей конвективного потока газа в ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале

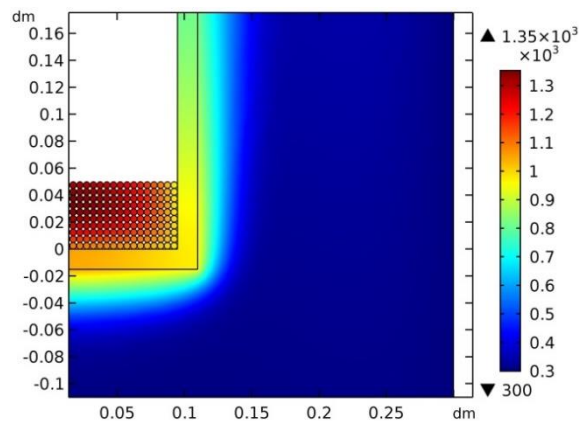


е) поле скоростей конвективного потока газа в ампуле в квазиравновесном состоянии в канале с водой

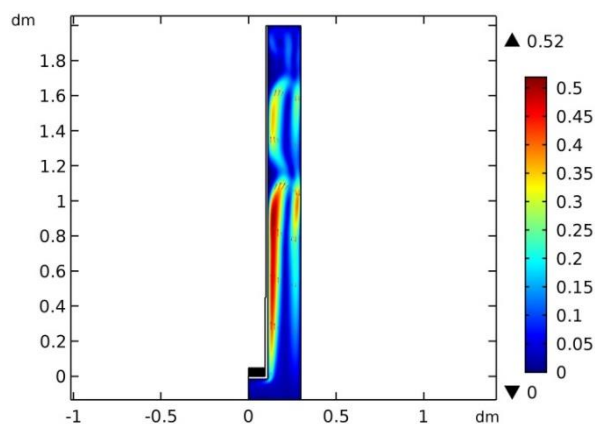
Рисунок 4. Результаты расчета температурных полей по ампуле с эвтектикой во время облучения



а) временная зависимость изменения температуры ампулы с керамикой, расположенной в сухом канале



б) распределение температуры по ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале



в) поле скоростей конвективного потока газа в ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале

Рисунок 5. Результаты расчета температурных полей по ампуле с керамикой (засыпка из шариков диаметром 0,5 мм) во время облучения

Достаточно высокая температура керамики (для всех расчетов) обусловлена большими значениями энерговыделения в ней и относительно низкой теплопроводности.

Был также проведен уточненный теплофизический расчет ампулы с керамикой в сухом канале, в котором керамика описывалась засыпкой из шариков диаметром 0,5 мм (см. рисунок 5), который показал, что максимальная температура керамики имеет почти те же значения, что и в расчете при представлении керамики в виде пористой среды.

Дополнительно был проведен расчет для ампулы с расположением керамики как показано на рисунке 6. Результаты расчета представлены на рисунке 7. Максимальная температура керамики составила около 1273 К.

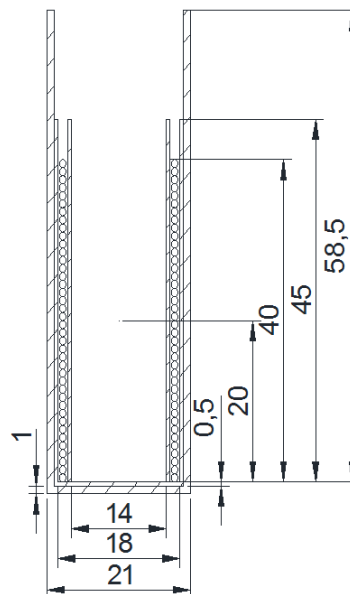
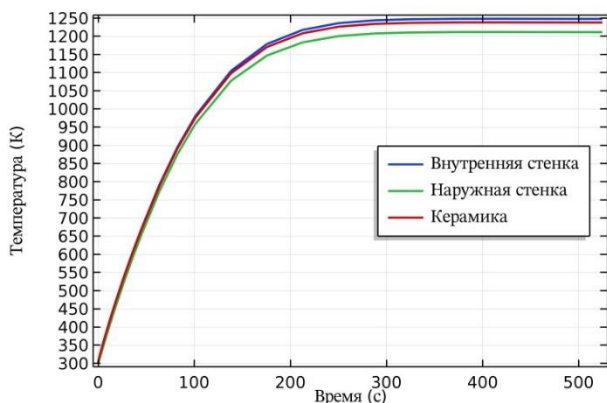
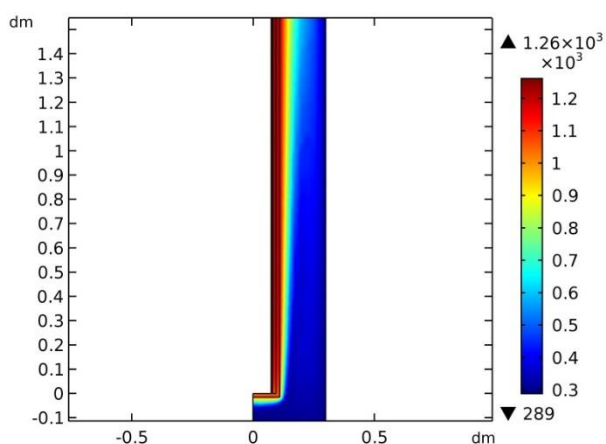


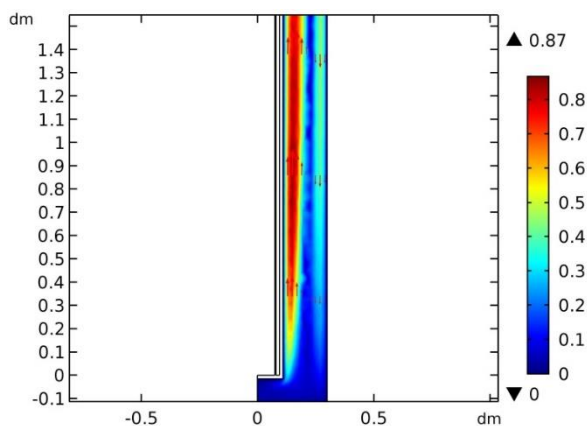
Рисунок 6. Расчетная геометрия облучательной ампулы с расположением образцов по стенкам ампулы.



а) временная зависимость изменения температуры ампулы с керамикой, расположенной в сухом канале



б) распределение температуры по ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале



в) поле скоростей конвективного потока газа в ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале

Рисунок 7. Результаты расчета температурных полей по ампуле с керамикой во время облучения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью расчётной модели, были получены временные зависимости динамики нагрева и распределения температурных полей для облучательных ампул из нержавеющей стали, содержащих различные материалы бридеров ТЯР.

По полученным результатам были сделаны следующие выводы:

1. Для всех расчетов оказалось, что время наступления равновесного состояния составляет менее 1500 с.

2. Для сухого канала минимальная температура облучения для жидкометаллических бридерных систем будет меньше 723 К, что хорошо совпадает с задачами исследования поведения этих материалов в бридере ТЯР.

3. Как для сухого канала, так и для канала с водой, минимальная температура исследования литевой керамики (для всех типов ампул) достаточно высока и требует дополнительных мер по ее снижению.

4. В качестве основных мер по снижению температуры исследования керамики следует рассмотреть следующие изменения в конструкции ампулы:

а) Снижение энерговыделения в керамике за счет установки экрана по стенкам ампулы (экрана, ослабляющего поток тепловых нейтронов до значений скорости наработки трития в керамике, соответствующего ожидаемым скоростям наработки в бридерах ТЯР);

б) Увеличение теплопроводности системы внутри ампулы за счет прокладки металлической сетки между пэбблами литевой керамики.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании ампул для облучательных испытаний материалов бридеров ТЯР на различных исследовательских реакторах.

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования по научным, научно-техническим программам на 2018–2020 годы (номер программы – BR05236400) Министерства образования и науки Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Terai T., Nagai S., Takahashi Y., Yoneoka T. Mass transfer coefficient of tritium from molten lithium lead alloy (Li17Pb83) to environmental gas under neutron irradiation // *Fus. Eng. Des.* – 1991. – Vol. 17. – P. 237-241.
2. Alexander V. Fedorov, Lida Magielsen. Analysis of in-pile operation and modeling of tritium transport in lead-lithium irradiation experiments Libretto 4/1, 4/2 and 5 // *Fusion Engineering and Design.* – 2011. – Vol. 86. – 2370–2373.
3. Suzuki, J. Yagi, M. Nagura, D. Komiyama, T. Terai. Tritium release from PbLi natural convection loop under neutron irradiation // *Fusion Science and Technology.* – 2012, 62:1, –P. 295-299, DOI: 10.13182/FST12-A14150.
4. Hollenberg G., Kurasawa T., The time Dependence of In-Situ Tritium Release from Lithium Oxide and Lithium Aluminate (VOM-22H Experiment) // *J. Nucl. Mater.* – 1986. – Vol. 141–143, – P. 265 – 268.
5. Tazhibayeva, I.L. Material Science Activities for Fusion Reactors in Kazakhstan / I.L. Tazhibayeva, T.V. Kulsartov, E.A. Kenzhin // *Journal of the Nuclear Materials.* – 2009. – Vol. 386-388. – pp. 15-18.
6. Tazhibayeva et al. Study of properties of tungsten irradiated in hydrogen atmosphere / I. Tazhibayeva, M. Skakov, V. Baklanov, E. Koyanbaev, A. Miniyazov, T. Kulsartov, Y. Ponkratov, Y. Gordienko, and Z. Zaurbekova // *Nuclear Fusion*, Volume 57, Number 12. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa7911>
7. Sadvakassova, A.O. Research of Reactor Radiation Influence upon Processes of Hydrogen Isotopes Interaction with Materials of the Fusion Facility/ A.O. Sadvakassova, T.V. Kulsartov, I.L. Tazhibayeva, E.A. Kenzhin // *Fusion Science and Technology.* – 2011. – Vol. 60. – №1 Т. – pp. 9-15.
8. Kulsartov, T.V. TRITIUM MIGRATION IN THE MATERIALS PROPOSED FOR FUSION REACTORS: Li₂TiO₃ AND BERYLLIUM / T.V. Kulsartov, Yu.N. Gordienko, I.L. Tazhibayeva, E.A. Kenzhin, N.I. Barsukov, A.O. Sadvakassova, A.V. Kulsartova and Zh.A. Zaurbekova // *Journal of the Nuclear Materials.* – 2013. – Vol. 442. – P. 740-745.
9. Tazhibayeva, V. Baklanov, Yu. Ponkratov, Kh. Abdullin, T. Kulsartov, Yu. Gordienko, Zh. Zaurbekova, I. Lyublinski, A. Vertkov, M. Skakov. Development of technology for fabrication of lithium CPS on basis of carboxylic fabric coated with carbon nanotubes. – *Fusion Engineering and Design*, Volume 117, April 2017, Pages 168–174.
10. Irina Tazhibayeva, Yuriy Ponkratov, Timur Kulsartov, Yuriy Gordienko, Mazhyn Skakov, Zhanna Zaurbekova, Igor Lyublinski, Alexey Vertkov, Giuseppe Mazzitelli. Results of reactor irradiation of liquid lithium saturated with deuterium. – *Fusion Engineering and Design*, Volume 117, April 2017, Pages 194-198.
11. Tazhibayeva, I. Temperature Dependence of Rate Constant of Hydrogen Isotopes Interaction with Lithium Capillary-Porous System under Reactor Irradiation / I. Tazhibayeva, T. Kulsartov, Yu. Gordienko, A. Mukanova, Yu. Ponkratov, N. Barsukov, E. Tulubayev, E. Platasis, E. Kenzhin // *Fusion Engineering and Design.* – 2013. – Vol. 88, Issues 9–10. – P. 1731-1734.
12. Interaction of tritium and helium with lead–lithium eutectic under reactor irradiation / I. Tazhibayeva, T. Kulsartov, N. Barsukov, Y. Gordienko, Y. Ponkratov, Z. Zaurbekova, E. Tulubayev, V. Gnyrya, V. Baklanov, E. Kenzhin // *Fusion Engineering and Design.* – 2014. – Vol. 89, Issues 7–8. – P. 1486-1490.

ВВР-К РЕАКТОРЫНДА ЭКСПЕРИМЕНТТЕР ЖҮРГІЗҮ КЕЗІНДЕ ЛИТИЙ БАР МАТЕРИАЛДАРДАН ГАЗ ШЫҒАРЫНДЫЛАРЫН ЗЕРТТЕУ ҮШІН РЕАКТОР АМПУЛЫНЫҢ ТЕРМОФИЗИКАЛЫҚ ЕСЕПТЕУЛЕРІ

¹⁾ Е.В. Чихрай, ^{1,2)} С.К. Аскербек, ²⁾ А.А. Шаймерденов, ²⁾ Ш.Х. Гизатуллин,
²⁾ А.М. Аханов, ²⁾ Е.А. Кенжин, ³⁾ Е.Б. Кабулбек

¹⁾ *ЭТФ ФЗИ Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан*

²⁾ *ЯФИ РМК, Алматы, Қазақстан*

³⁾ *Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан*

Бұл мақалада ВВР-К реакторында ТЯР материалдарын ұзақ мерзімді сынақтан өткізу үшін объект құру бойынша жобаны іске асыру бойынша жұмыстың кезеңдерінің бірі берілген. Атап айтқанда, ТЯР бридерлерінің әртүрлі материалдары (литий керамикасы және қорғасын-литий эвтектикасы) бар, тот баспайтын болаттан жасалған сәулелендіру ампуласының термофизикалық есептемелері туралы деректер келтірілген.

Есептеулер үшін барлық элементтер бірдей осьте орналасқан 3 өлшемді осьсимметриялық модель пайдаланылды.

Жылу және масса тасымалын модельдеу үшін ампула металлындағы жылуды есептеу және ампула бетімен байланыстағы ауа ағынын есептеп, ағынның жылдамдығын және қысымын бөлуді есептеу үшін жылу алмасуды сұйық және ламинарлы ағындар субмодульдерінде біріктіретін *Nonisothermal Flow* модуль қолданды.

Ампуланың жылыту динамикасы және температура өрістерінің бөлінуі бағаланып, сәулелену экспериментінің параметрлері турасында қорытынды жасалды.

**THERMOPHYSICAL CALCULATIONS OF REACTOR AMPOULE
FOR STUDYING OF GAS RELEASE FROM LITHIUM-CONTAINING MATERIALS
WHEN CONDUCTING EXPERIMENTS ON WWR-K REACTOR**

¹⁾ Ye.V. Chikhray, ^{1,2)} S.K. Askerbekov, ²⁾ A.A. Shaimerdenov, ²⁾ Sh.Kh. Gizatullin,
²⁾ A.M. Ahanov, ²⁾ Ye.A. Kenzhin, ³⁾ E.B. Kabulbek

¹⁾ *IETP of al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *INP of Ministry of Energy of RK, Almaty, Kazakhstan*

³⁾ *Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan*

This article presents one of the stages to create a facility for long-term testing of fusion materials at the WWR-K reactor. Particularly, data are presented on thermophysical calculations of an irradiating ampoule made of stainless steel containing various materials of fusion breeders: lithium ceramics, lead-lithium eutectic.

The 3-dimensional axisymmetric model was used for calculations, according to which all elements are on the same axis. To simulate heat and mass transfer, we used the multiphysical module *Nonisothermal Flow*, which integrates the Heat Transfer in Fluids and Laminar Flow submodules for calculating the heat transfer in the ampoule metal and in the air flow in contact with the ampoule surface, and for calculating the velocity and pressure distribution in the flow, respectively. The dynamics of heating and the distribution of temperature fields in the ampoule were evaluated on the basis of which conclusions were made about parameters of the irradiation experiment.