
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.52

EDN: TGWCMV

**ВЛИЯНИЕ НА РЕАКТИВНОСТЬ ПЛАВЛЕНИЯ СИЛУМИНА
В ДИСПЕРСИОННЫХ ТВЭЛАХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ
ПРИ РАЗГОНАХ НА МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНАХ****Д.Е. Богомолов**

ORCID: 0009-0007-8405-344X e-mail: bogomolov_de@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»
*Нижний Новгород, Россия***Д.Г. Кресов**

ORCID: 0009-0002-6169-7801 e-mail: dkresov@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

С привлечением упрощенной модели твэла расчетно исследован начальный этап аварийного режима типа RIA со ступенчатым вводом положительной реактивности, сопровождающегося разогревом дисперсионной топливной композиции в наиболее теплонапряженных участках твэлов выше температуры плавления силуминовой матрицы. Временная задержка разогрева части топлива активной зоны из-за потерь энергии на разрушение кристаллической структуры силумина приводит к снижению энергии, передаваемой в теплоноситель, и ослаблению доплеровского эффекта. Вследствие этих процессов ядерная энергия, выделяющаяся в период вспышки мощности, увеличивается с перекомпенсацией потерь на плавление, преимущественно из-за тепловой инерции. Моделирование начала развития модельной аварийной ситуации показывает, что максимумы температур в активной зоне снизились, но возросла удельная нагрузка на твэл в период «вспышки» мощности.

Получена зависимость отношения суммарной энергии, выделяющейся в процессе «вспышки», к энергии, идущей собственно только на разогрев твэла, от объемной доли топливной композиции в активной зоне, достигшей температуры плавления силумина. Рекомендован учет процесса плавления силумина при исследованиях существенно запроектных реактивных аварий.

Ключевые слова: дисперсионное топливо, плавление силумина, эффекты реактивности, безопасность реакторов.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Богомолов, Д.Е. Влияние на реактивность плавления силумина в дисперсионных твэлах ядерных реакторов при разгонах на мгновенных нейтронах / Д.Е. Богомолов, Д.Г. Кресов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 37-43. EDN: TGWCMV

**EFFECT ON REACTIVITY OF SILUMINE MELTING
IN DISPERSION FUEL ELEMENTS OF NUCLEAR REACTORS
AT ACCELERATION ON INSTANTANEOUS NEUTRONS****D.E. Bogomolov**

ORCID: 0009-0007-8405-344X e-mail: bogomolov_de@okbm.nnov.ru

«Afrikantov» Joint Stock Company
*Nizhny Novgorod, Russia***D.G. Kresov**

ORCID: 0009-0002-6169-7801 e-mail: dkresov@okbm.nnov.ru

«Afrikantov» Joint Stock Company
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of calculations of the initial stage of the RIA type emergency mode with a stepwise introduction of positive reactivity using a simplified fuel element model. This process is accompanied by heating of the dispersion fuel composition in the most heat-stressed sections of the fuel elements above the melting point of the silumin matrix. The time delay in the heating of part of the core fuel due to energy losses on the destruction of the crystalline structure of silumin leads to a decrease in the energy transmitted to the coolant and a weakening of the Doppler effect. As a result of these processes, the nuclear energy released during the power «flash» increases with the overcompensation of melting losses, mainly due to thermal inertia. Modeling of the beginning of the model emergency situation shows that the maximum temperatures in the core decreased, but the specific load on the fuel element increased during the «flash» of power.

The relationship between the ratio of the total energy released during the «flash» process and the energy used only to heat the fuel element from the volume fraction of the fuel composition in the core that has reached the melting point of silumin is obtained. It is recommended to take into account the melting process of silumin during studies of significantly beyond design basis reactivity accidents.

Key words: dispersion fuel, silumin melting, reactivity effects, reactor safety.

FOR CITATION: Bogomolov D.E., Kresov D.G. Effect on reactivity of silumine melting in dispersion fuel elements of nuclear reactors at acceleration on instantaneous neutrons. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 37-43. EDN: TGWCMV

Введение

Одной из характеристик аварии типа RIA является выделившееся в твэлах количество энергии, выступающее в качестве критериального параметра при обосновании безопасности [1]. Способность реактора противостоять аварийным возмущениям собственными качествами в значительной мере определяется величиной и оперативностью срабатывания отрицательных обратных связей. Используемые в современных водо-водяных реакторах малой мощности судового и стационарного назначения дисперсионные твэлы содержат относительно легкоплавкую силуминовую матрицу (сплав алюминия с кремнием и никелем). В связи с этим возник интерес к количественной оценке эффекта от задержки разогрева топливной композиции (ТК), связанной с расходом выделяющейся в топливной крупке энергии, на разрушение кристаллической структуры силумина при его плавлении.

В настоящей работе данный эффект расчетно анализируется в режимах ступенчатого ввода внешней положительной реактивности на данных реакторной установки (РУ) типа РИТМ-200, в исходном состоянии находящейся в «холодных» пусковых условиях с выведенными в критическое положение регулирующими органами. С учетом новизны исследований прежде всего анализируется этап «вспышки» мощности вплоть до значимого количества передачи тепла в теплоноситель на последующей квазистатической стадии процесса.

В работе приняты следующие посылки и предположения:

- 1) ТК и оболочка твэла описываются (каждая) одним инерционным звеном (при этом температура урановых гранул одинакова по всему их объему и равна температуре силумина в каждый момент времени);
- 2) в твэле учитываются только радиальные перетечки тепла;
- 3) объемные соотношения металлического топлива (диоксида урана), силумина и пустот в ТК взяты соответствующими необлученному свежему топливу из представленных в [2] данных, исходя из максимально возможной доли силумина (55, 25 и 20 % соответственно);
- 4) теплофизические и механические свойства ТК после плавления силумина не меняются;
- 5) температуры плавления составляющих материалов твэла: силумина – 577 °С [2], диоксида урана – 2850 °С [3], оболочки твэла и вытеснителя – 1350 °С [4];
- 6) при достижении ТК температуры 577 °С последняя сохраняется постоянной для всей ТК в течении времени плавления силуминовой матрицы;
- 7) активная зона описывается десятью эквивалентизированными расчетными каналами с 16 высотными участками;

- 8) распределение нейтронных полей в переходном процессе по объему активной зоны постоянно (используется динамическая модель реактора с точечным описанием нейтронной кинетики);
- 9) доплеровский коэффициент реактивности описывается с учетом формулы Брейта–Вигнера для сечения радиационного захвата [5]: $\alpha_D \sim 1/\sqrt{T_{TK}}$, где α_D – доплеровский коэффициент, T_{TK} – температура топливной композиции.

Оценка времени плавления силуминовой матрицы. В качестве времени плавления силумина принималась величина его тепловой инерционности, исходя из соотношения $\tau = \gamma c r^2 / \lambda$, где в числителе – плотность, теплоемкость и квадрат характерного размера материала соответственно, а в знаменателе – теплопроводность. Твэл моделируемой РУ представлялся в виде цилиндрического стержня с соосно ему расположенным цилиндрическим вытеснителем (рис. 1). ТК занимает объем между вытеснителем и оболочкой твэла.

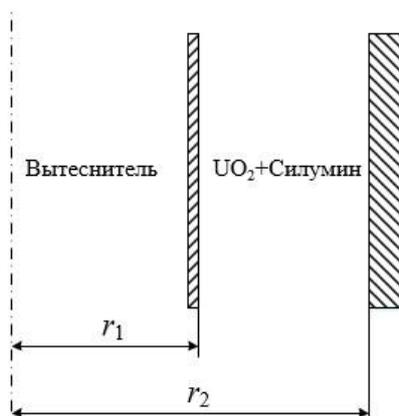


Рис. 1. Схема твэла в продольном сечении

Fig. 1. Diagram of fuel element in longitudinal section

Первый подход. Тепловая инерционность (и теплофизические характеристики) составляющих ТК оценивается пропорционально их объемной доле. Отсюда время плавления силумина рассчитывалось по формуле: $\tau_1 = \gamma c (r_{xV})^2 / \lambda$, где γ , c , λ – усредненные теплофизические характеристики ТК, r – расстояние между вытеснителем и оболочкой (рис. 1), $x_V = 0,25$ отн.ед. – объемная доля силумина в ТК [2]. Оцененная величина времени плавления в данном подходе: $\tau_1 = 0,019$ с.

Второй подход. Инерционность оценивается исходя из характерного размера, пропорционального пути передачи тепла в силумине, огибающего гранулы диоксида урана. Линейный размер гранул принят равным минимальному из [6, 7] и составляющему 250 мкм. Рассматривалась модель, в соответствии с которой гранулы представляют собой одинаковые шары, расположенные в равносторонней треугольной решетке со стороной 320 мкм. Модель выбрана исходя из принятого диаметра гранул и объемного содержания урана в ТК (рис. 2). Области, занятые пустотами, считались находящимися вне огибающей.

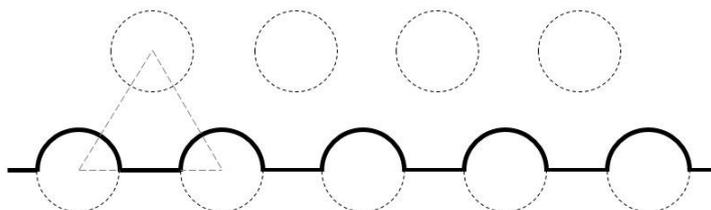


Рис. 2. Гипотетический путь передачи тепла по силумину от вытеснителя до оболочки

Fig. 2. Hypothetical rout of heat transfer through silumin from the displacer to the shell

Время плавления силумина в ТК рассчитывалась по формуле: $\tau_2 = \rho c l^2 / \lambda$, где $\rho = 2680 \text{ кг/м}^3$, $c = 900 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$, $\lambda = 150 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ – теплофизические характеристики силумина [3], $l = 0,0023 \text{ м}$ – расчетный характерный размер, равный длине огибающей. Расчетное значение времени плавления в данном подходе: $\tau_2 = 0,085 \text{ с}$.

Результаты расчетов

На рис. 3 для временного интервала, ограниченного продолжительностью импульса мощности, приведена энергия, выделившаяся при учете плавления силуминовой матрицы (E), отнесенная к выделившейся энергии в традиционной, не учитывающей плавление, модели (E_0) в зависимости от объемной доли ТК, достигшей температуры 577 °C (отнесенной к объему ТК во всей активной зоне). При этом рассматривались вводимые скачком величины реактивности $\Delta\rho$ от 1,6 до 2,2 $\beta_{эф}$ с результирующей полушириной импульса $\Delta\tau$ от $5,3\cdot 10^{-5}$ до $2,7\cdot 10^{-5} \text{ с}$ соответственно ($\Delta\tau = 3,524/(\Delta\rho - \beta_{эф})$) [8], $l = 10^{-5} \text{ с}$ – время жизни мгновенных нейтронов). Изменения величины $\Delta\rho$ в указанном интервале задавались от расчета к расчету с шагом 0,1 $\beta_{эф}$. Каждый расчет отмечен на графиках точкой.

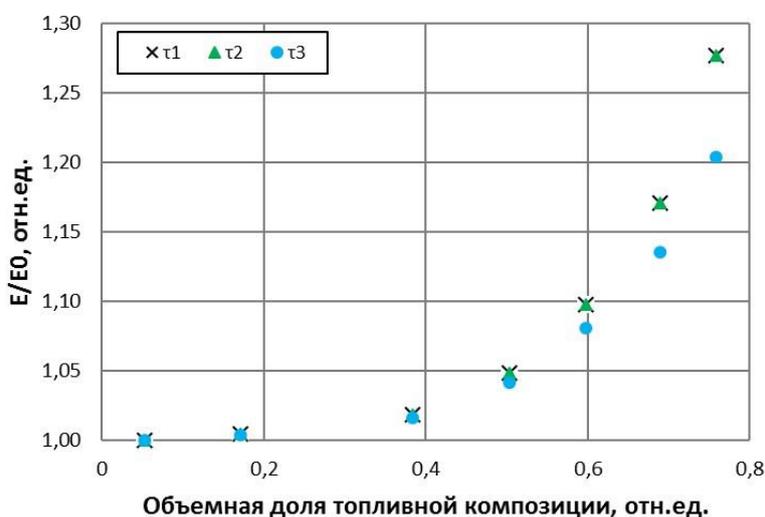


Рис. 3. Зависимость поправки к выделившейся энергии от объемной доли ТК, достигшей температуры плавления силумина

Fig. 3. Relation of correction to released energy on volume fraction of fuel composition reaching melting point of silumin

Существенно, что момент начала плавления силумина при всех рассмотренных скачках реактивности практически совпадал по времени с пиком мощности. Это означает, что для рассматриваемых характеристик активной зоны эффект от плавления не сказался на переднем фронте мощностного импульса.

Варьирование тепловой инерционности в пределах обоих подходов практически не повлияло на форму импульса. Это связано с тем, что длительность заднего фронта импульса оказалась сопоставимой с тепловой инерционностью τ_1 . Соответственно, вышедший первым в режим плавления силумина расчетный участок в первом подходе полностью расплавился практически к моменту окончания вспышки. Во втором подходе ($\tau = \tau_2$) к моменту окончания вспышки процесс расплавления еще не закончился, и в силу этого не скорректировал результат с временем плавления τ_1 (пробное снижение инерционности до $\tau_3 = 0,003 \text{ с}$ [путь передачи тепла через силумин по прямой] дало количественно значимое приближение к традиционной модели, подтверждая сохранение предельного перехода в расчете).

Используя известное соотношение Нордгейма-Фукса для выделившейся энергии, можно вычислить поправки к доплеровскому коэффициенту для традиционного модельного подхода (рис. 4). Под отношением α/α_0 понимается отношение доплеровского коэффициента с учетом плавления силумина к доплеровскому коэффициенту без учета плавления. Приняв во внимание подобную поправку в рамках использованных подходов, можно учесть исследуемый эффект от плавления без явного его моделирования.

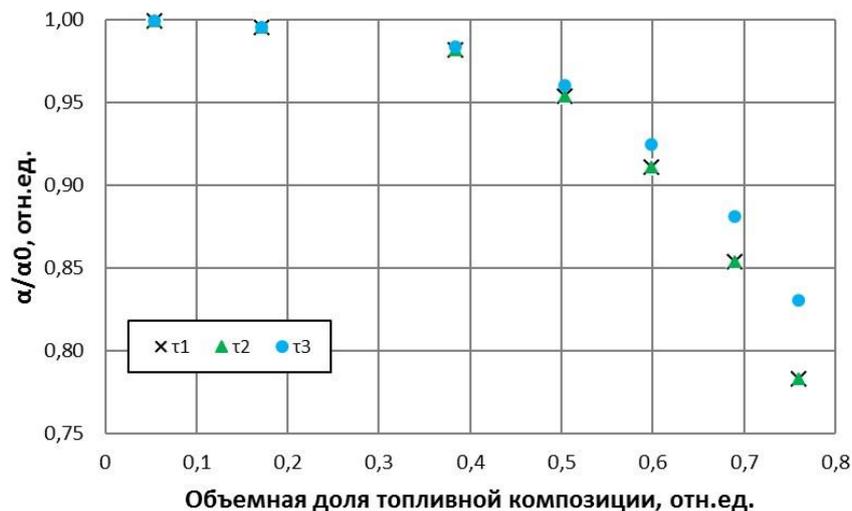


Рис. 4. Зависимость поправки к доплеровскому коэффициенту от объемной доли ТК, достигшей температуры плавления силумина

Fig. 4. Relation of correction to Doppler factor on volume fraction of fuel composition reaching melting point of silumin

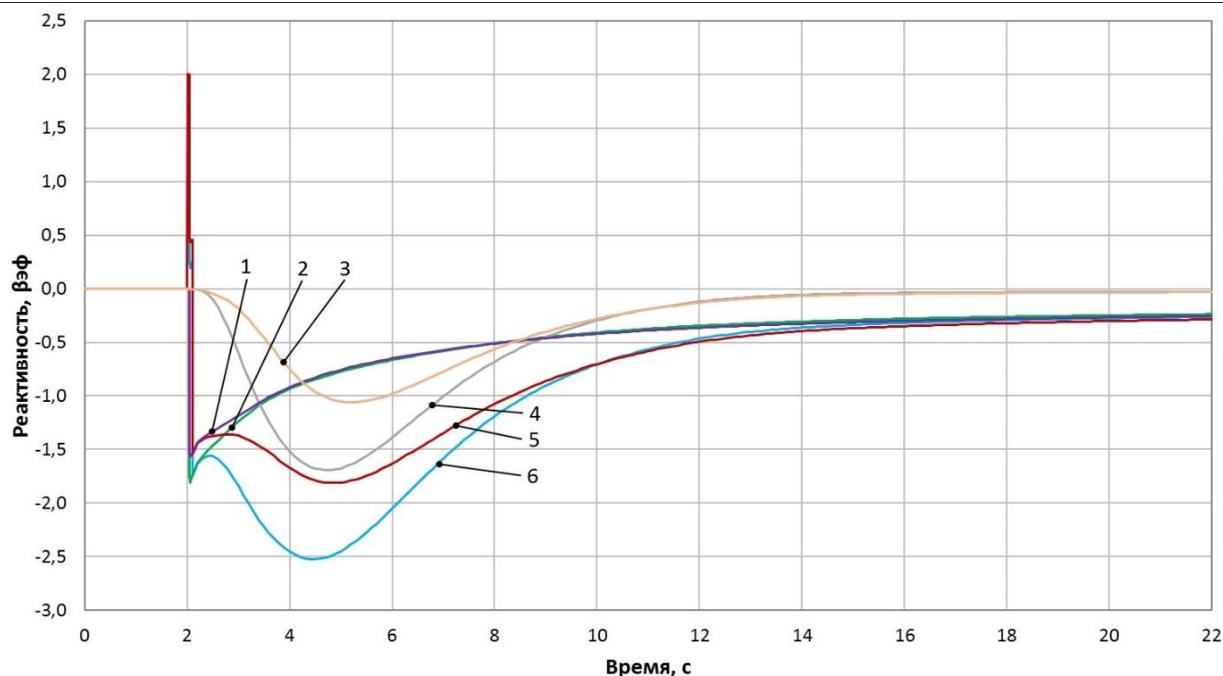


Рис. 5. Зависимость реактивных эффектов от времени: 1, 2 – доплеровский эффект; 3, 4 – эффект по теплоносителю; 5, 6 – суммарная реактивность; кривые 1, 3, 5 соответствуют $\tau = \tau_1$; кривые 2, 4, 6 соответствуют $\tau = 0$

Fig. 5. Relation of reactivity effects on time: 1, 2 – Doppler effect; 3, 4 – coolant T-effect; 5, 6 – total reactivity; curves 1, 3, 5 correspond to $\tau = \tau_1$; curves 2, 4, 6 correspond to $\tau = 0$

Моделирование последующего квазистатического этапа аварии показало, что, по крайней мере, при $\tau \geq \tau_1$ максимальная температура твэлов ограничивается температурой плавления силумина (ввод положительной реактивности и «вспышка» мощности закончились). При достижении отдельными участками твэлов температуры 577°C эффективность доплеровского эффекта снижается, приводя к замедлению спада мощности и, как следствие, к увеличению темпа разогрева ТК на сравнительно холодных участках зоны, однако с инерционным запаздыванием и до температуры, не выше 577°C .

На рис. 5 представлены временные зависимости реактивных эффектов при моделировании аварийной ситуации с релейным вводом положительной реактивности $2,0 \beta_{\text{эф}}$ в традиционном подходе ($\tau = 0$) и при $\tau = \tau_1$.

Полученные зависимости иллюстрируют снижение эффективности отрицательных обратных связей при учете плавления силуминовой матрицы. Ограничение темпа разогрева топлива активной зоны из-за потерь энергии на плавление приводит к ослаблению доплеровского эффекта и снижению энергии, передаваемой в теплоноситель из-за ограничения температурного перепада между оболочкой твэла и водой. В результате выделяющаяся в период «вспышки» энергия увеличивается с перекомпенсацией потерь на плавление и возрастанием импульсной нагрузки на твэл.

Заключение

Расчетные исследования подтвердили ожидаемый эффект снижения эффективности отрицательной обратной связи при учете эффекта от плавления силуминовой матрицы в дисперсионных твэлах. Полученная зависимость поправок к выделившейся энергии на этапе «вспышки» мощности аппроксимируется полиномиальной функцией четвертой степени. При этом для рассматриваемых условий поправка к выделившейся энергии (и доплеровскому коэффициенту) составила 5 % при выходе в режим плавления половины силумина, содержащегося в активной зоне, и около 20 % при расплавлении 75 % силумина.

При постоянной твэла, сопоставимой с полушириной импульса (или меньшей ее) [9] эффект от потери части энергии на плавление должен привести к дополнительной энергетической поправке из-за более ранней – в период вспышки – задержки передачи соответствующей части тепла в теплоноситель (кроме доплеровского «задержится» и T-эффект). В рассмотренных условиях снижение T-эффекта также имеет место, однако только на квазистатическом этапе процесса.

Моделирование ТК как однородного материала на этапе плавления силумина представляется сильно упрощенной посылкой: целесообразна проработка модели теплопередачи между урановой крупкой и расплавляющимся силумином, возможно с учетом динамики исчезновения пустот. Учет аксиальных перетечек тепла приведет к снижению температурных градиентов и в результате – к задержке роста доплеровского эффекта (возрастает с увеличением температуры $\rho_D \sim \int 1/\sqrt{T} dT \sim 2\sqrt{T}$) и более консолидированному в объеме твэла достижению температуры плавления матрицы. Учет динамики нейтронных полей также может внести поправки в эффект, однако знак и величина поправки будут зависеть, очевидно, от исходной конфигурации поглотителей и координаты извлекаемой решетки.

Неисследованный обратный процесс – кристаллизация расплавленного силумина с выделением в теплоноситель дополнительной энергии при остывании ТК – представляет интерес, например, в силу возможности образования или увеличения площади паровой пленки на поверхности твэлов. Возникающая при этом отрицательная обратная связь «снижение температуры – кристаллизация – выделение энергии – ухудшение теплоотдачи – повышение температуры» может стать предпосылкой к замедлению процесса остывания твэла.

С учетом полученной сильной функциональной зависимости (полином четвертой степени) энергетической поправки от доли расплавленного силумина, важны также оценки чувствительности результатов к имеющимся погрешностям и неопределенностям.

Изложенное позволяет сделать заключение о необходимости учета плавления силумина в слабо облученных дисперсионных твэлах (до взаимодействия компонентов топливной композиции с соответствующей убылью алюминиевого сплава [10] в процессе кампании) при моделировании инцидентов со значительным вводом положительной реактивности. Представляется необходимым продолжение исследований и развитие соответствующей методической базы в интересах повышения представительности обоснования безопасности.

Библиографический список

1. **Седов, А.А.** Некоторые безопасностные и феноменологические аспекты быстрых реактивностных аварий водоохлаждаемых реакторов. Методологические проблемы их моделирования // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 1996. Вып. 3. С. 104-114.
2. **Савченко, А.М.** Испытания дисперсионных твэлов с жаропрочным сердечником с регулируемой пористостью для атомных станций малой мощности / А.М. Савченко, Ю.В. Коновалов, Г.В. Кулаков и др. // Атомная энергия. 2021. Т. 131. Вып. 6. С. 324-327.
3. **Чиркин, В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник / В.С. Чиркин. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
4. **Карпюк, Л.А.** Сплав 42ХНМ и карбид кремния как материал оболочек твэлов, устойчивых к авариям / Л.А. Карпюк, В.В. Новиков, Г.В. Кулаков и др. // Атомная энергия. 2021. Т. 130, Вып. 4. С. 211-215.
5. **Бартоломей, Г.Г.** Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алтухов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
6. **Кулаков, Г.В.** Разработка твэлов плавучих энергоблоков и атомных станций малой мощности / Г.В. Кулаков, А.В. Ватулин, С.А. Ершов и др. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2012. Вып. 1 (72). С. 14-25.
7. **Кулаков, Г.В.** Основные результаты разработки металлокерамического топлива дисперсионного типа для реакторов плавучих энергоблоков и атомных станций малой мощности / Г.В. Кулаков, А.В. Ватулин, С.А. Ершов // «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», международная научно-техническая конференция: Москва, 27-29 ноября 2012. Сборник докладов. – М.: НИКИЭТ, 2012. С. 148-164.
8. **Хетрик, Д.** Динамика ядерных реакторов / Д. Хетрик : [перевод с английского]. – М.: Атомиздат, 1975. – 400 с. – Перевод изд.: Dynamics of nuclear reactors / David L. Hetrick. The University of Chicago Press, Chicago and London.
9. **Шмелев, А.Н.** О роли параметра времени жизни нейтронов реактора в разгонах на мгновенных нейтронах (модельное рассмотрение) / А.Н. Шмелев, Г.Г. Куликов, В.А. Апсэ и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 7-8. С. 578-592.
10. **Кулаков, Г.В.** Разработка тепловыделяющих элементов для атомных станций малой мощности / Г.В. Кулаков, А.В. Ватулин, С.А. Ершов и др. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2021. Вып. 2 (108). С. 101-110.

*Дата поступления
в редакцию: 10.07.2024*

*Дата принятия
к публикации: 29.10.2024*