

# ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ САМОЗАЩИЩЕННОСТИ БН-800 ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВС С МИКРОСФЕРИЧЕСКИМ СМЕШАННЫМ (U, Pu)С-ТОПЛИВОМ

**Н.В. Маслов\*, Е.И. Гришанин\*\*, П.Н. Алексеев\*\***

\* НИЯУ «МИФИ»

115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

\*\* НИЦ «Курчатовский институт»

123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1



На примере реактора типа БН-800 рассмотрена возможность повышения внутренней самозащищенности быстрых реакторов с натриевым теплоносителем за счет использования в ТВС активной зоны смешанного уран-плутониевого карбидного топлива в форме микротвэлов. Для обоснования возможности применения микротвэльного топлива в быстрых натриевых реакторах было проведено расчетное сравнение нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик инновационной ТВС с микросферическим смешанным (U, Pu)С-топливом и традиционной ТВС с таблеточным МОКС-топливом и стержневыми твэлами. В качестве расчетной модели была рассмотрена активная зона ядерного реактора на быстрых нейтронах типа БН-800 с микросферическим смешанным (U, Pu)С-топливом, в которой используется трехзонное по радиусу выравнивание поля энерговыделения за счет изменения содержания плутония в ТВС.

Представлены дополнительные возможности для повышения внутренней самозащищенности и улучшения характеристик конкурентоспособности реакторов такого типа. Благодаря микросферическому карбидному топливу повышается безопасность реактора в авариях с потерей расхода теплоносителя и с вводом положительной реактивности, так как микротвэлы имеют развитую поверхность теплообмена и их покрытия способны удерживать продукты деления при более высоких температурах, чем стальная оболочка традиционных стержневых твэлов.

**Ключевые слова:** внутренняя самозащищенность, быстрые натриевые реакторы, микротвэл, плотное смешанное карбидное топливо, ТВС с микросферическим топливом.

## ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуется возможность применения ТВС с микротвэлами для повышения внутренней самозащищенности натриевого реактора на быстрых нейтронах на примере БН-800 [1 – 5]. Микротвэлы (МТ) были разработаны для высокотем-

© Н.В. Маслов, Е.И. Гришанин, П.Н. Алексеев, 2019

пературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР). На основании конструкции МТ были обоснованы высокотемпературные характеристики ВТГР: температура гелиевого теплоносителя более 750°C, сверхкритические параметры пара, КПД более 45% для паровой турбины и около 50% для газовой турбины, удержание продуктов деления до температуры 1600 – 1800°C в аварии с потерей теплоносителя.

Преимущества использования микросферического топлива для целей повышения внутренней самозащищенности пока недостаточно изучены в атомной отрасли. Есть основания полагать, что МТ могут применяться в реакторах различных типов с дополнительным к повышению безопасности технико-экономическим эффектом. Уникальные качества микросферического топлива рассматриваются в качестве новой элементной базы ядерной энергетики, включая жидкометаллические реакторы на быстрых нейтронах [6 – 8].

В случае прямой замены в активной зоне реактора типа БН-800 штатных ТВС с цилиндрическими твэлами на ТВС с МТ с (U, Pu)С-топливом не ожидается повышения температуры топлива выше 750°C при сохранении среднесмешанной температуры натрия на выходе активной зоны на уровне 550°C.

Мотивацией для рассмотрения применения ТВС с МТ в активной зоне реактора типа БН-800 является

- возможность повышения внутренней самозащищенности в режимах тяжелых аварий (потеря теплоносителя, введение большой положительной реактивности, террористические акты);

- отсутствие ограничений по параметрам пара и перспектива в будущем достижения высокого КПД при повышении среднесмешанной выходной температуры натрия и использовании высоких параметров пара до (37 МПа, 700°C) [9 – 11];

- низкая температура топлива позволяет рассчитывать на среднее выгорание топлива 10% т.я. при относительно небольшой толщине наружной оболочки МТ;

- уменьшение количества стали в активной зоне и применение смешанного уран-плутониевого карбидного топлива обеспечивают улучшенные характеристики воспроизводства топлива.

Основным фактором, ограничивающим повышение эффективности преобразования энергии для современных реакторов с жидкометаллическим теплоносителем (натрием или свинцом), является необходимость применения стальных оболочек стержневых твэлов. Даже при работе в номинальном режиме их допустимая температура не превышает 700 – 710°C. Поэтому температура пара получается около 480 – 500°C, а КПД ~42%. При этом в аварийных режимах для повышения температуры стальных оболочек имеется только небольшой запас. Уже при температуре оболочек около 900°C стальные оболочки твэлов теряют герметичность, и газовые продукты деления выходят в теплоноситель первого контура. В случае применения микросферического топлива с большим запасом по температуре оболочки появляется возможность предотвратить выход большого количества активности в теплоноситель даже при кипении натрия.

### **КОМПОНОВКА АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ТИПА БН-800 С МИКРОСФЕРИЧЕСКИМ ТОПЛИВОМ**

В качестве исходной была принята картограмма штатной активной зоны БН-800 при полной ее загрузке МОКС-топливом [5]. Для выравнивания распределения поля энерговыделения по радиусу принята трехзональная компоновка с разным содержанием плутония в топливе каждой зоны. Расчетное обоснование содержания плутония в активной зоне было выполнено с использованием программного комплекса JARF [12]. При вариантных расчетах оценивались следующие нейтронно-

физические характеристики: коэффициент неравномерности энерговыделения, коэффициент воспроизводства реактора, коэффициент воспроизводства активной зоны, натриевый пустотный эффект, вклад в коэффициент воспроизводства от каждой из подзон, баланс реактивности.

Осуществлена прямая замена в активной зоне штатных ТВС с цилиндрическими твэлами с МОКС-топливом на ТВС с МТ с (U, Pu)С-топливом. Для охлаждения микровзвлов использовались ТВС с МТ с подачей теплоносителя из центра.

Такие ТВС могут применяться в штатной активной зоне БН-800 без изменения конструкции реактора и способа профилирования расхода натрия.

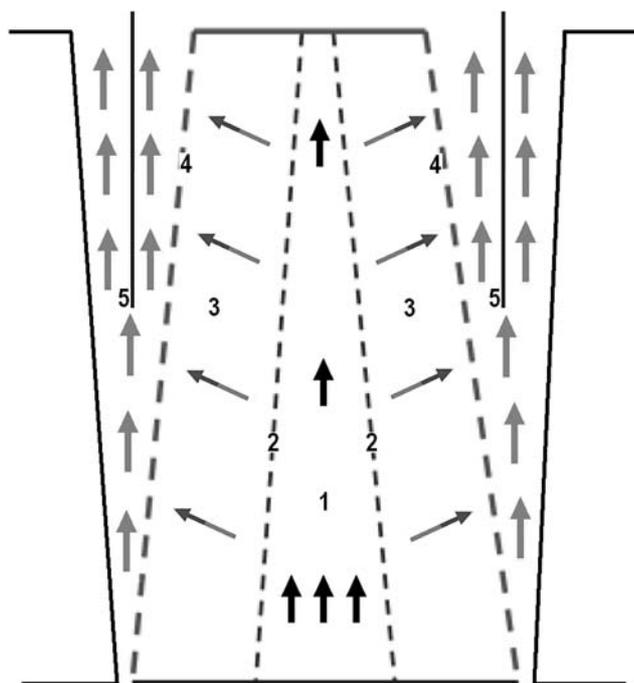


Рис. 1. Принципиальная схема ТВС с подачей теплоносителя из центра: 1 – раздающий коллектор; 2 – перфорированная стенка; 3 – засыпка микросферического топлива; 4 – перфорированная внешняя стенка; 5 – межкассетное пространство

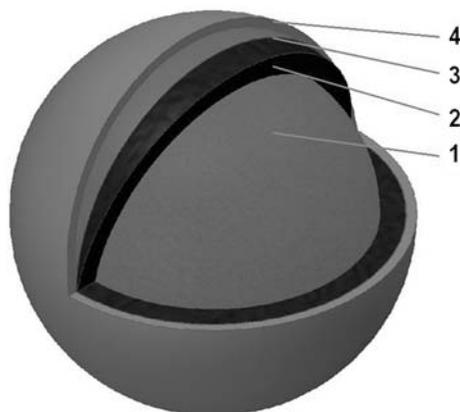


Рис. 2. Микровзвл: 1 – топливный ядро UС+PuС; 2 – пористый PuС; 3 – плотный PuС; 4 – SiС [13]

Принципиальная схема ТВС с МТ изображена на рис. 1. Хвостовик ТВС с МТ принят таким же, как в БН-800. Через хвостовик происходит подача теплоноси-

теля в перфорированный раздающий коллектор, распределяющий теплоноситель по засыпке микротвэлов в ТВС с МТ. Далее теплоноситель проходит через перфорацию во внешнем чехле ТВС и собирается в межкассетном пространстве. В таком типе ТВС весь натрий активной зоны принимает участие в теплообмене.

Конструктивная схема для микросферического топлива (рис. 2) аналогична схеме для БГР [13 – 17], а материальный состав покрытий приведен в табл. 1.

Такая конструктивная схема была выбрана в качестве примера и демонстрации возможности использования подобного типа топлива в быстром натриевом реакторе. В таблице 2 представлено сравнение характеристик ТВС с микротвэлами и штатной ТВС БН-800.

Таблица 1

**Состав микротвэла**

| Материал слоя         | Диаметр / толщина, мм | Плотность, г/см <sup>3</sup> |
|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| Топливный керн UC+PuC | 1.640 / –             | 12.0                         |
| Пористый PuC          | – / 0.125             | 0.8                          |
| Плотный PuC           | – / 0.005             | 1.8                          |
| SiC                   | – / 0.050             | 3.2                          |

Таблица 2

**Сравнение характеристик ТВС с МТ и ТВС БН-800**

| Параметр  | ТВС с МТ | ТВС БН-800 |
|---|----------|------------|
| Максимальная температура Na на выходе, °C               | 604.5    | 605        |
| Средняя температура Na на выходе, °C                    | 555      | 547        |
| Максимальная температура оболочек твэлов, °C            | 700      | 700        |
| Максимальная допустимая температура оболочек твэлов, °C | 1600     | 900        |
| Размер под ключ, мм                                     | 96       | 96         |
| Расход через одну ТВС, кг/с                             | 13.7     | 13.7       |
| Максимальный подогрев натрия, °C                        | 250.2    | 248.6      |
| Перепад давления, бар                                   | 1.5      | 7          |
| Максимальная температура топлива в рабочем режиме, °C   | 740      | 2100       |
| Максимально допустимая температура топлива, °C          | 1596.8   | 2696.8     |

## ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Методика расчета ТВС с МТ и с поперечным течением теплоносителя была разработана совместно сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт», ВНИИАМ и ЦКТИ. На основании этой методики сформулирована математическая модель и разработана двумерная программа RCOL для теплогидравлического расчета ТВС с поперечным течением теплоносителя в засыпке МТ. Полное описание математической модели, используемой в программе RCOL, представлено в [18 – 20].

В качестве ТВС с МТ использован вариант конструкции с подачей теплоносителя из центра в межкассетный зазор. Пористость коллекторов была выбрана исходя из факторов равномерности скорости теплоносителя во входном коллекто-

ре и температуры теплоносителя в выходном коллекторе.

Задачей теплогидравлического расчета ТВС с поперечным течением теплоносителя является обеспечение необходимого распределения расхода теплоносителя в соответствии с распределением мощности по высоте активной зоны, а также обеспечение приемлемого перепада давления и максимальной доли объема, занимаемого засыпкой МТ. Для ТВС такого типа неравномерность расхода по ее высоте обусловлена так называемым коллекторным эффектом. Приемлемый перепад давления обеспечивается выбором проходных сечений входного и выходного коллекторов, т.е. выбором диаметров усеченного конуса входного коллектора и максимального и минимального зазоров между ТВС. Эти же параметры в наибольшей степени влияют на неравномерность распределения расхода по высоте ТВС. В качестве ограничивающего параметра с точки зрения эрозии чехлов принималась максимальная скорость натрия. На рисунках 3 – 5 приведены некоторые результаты теплогидравлического расчета ТВС.

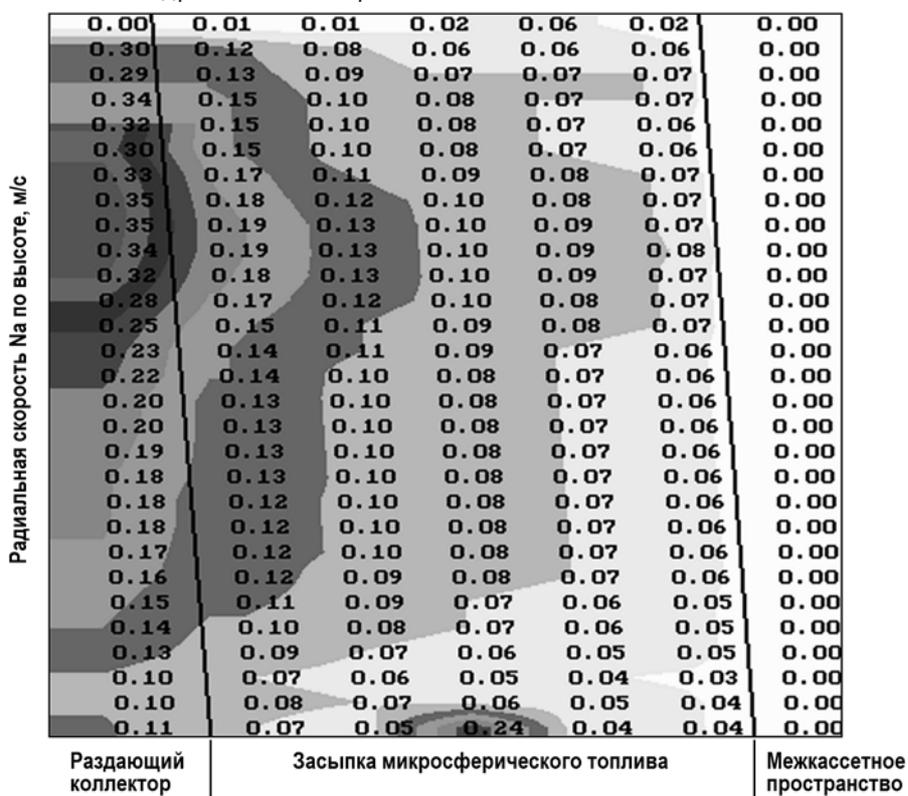


Рис. 3. Радиальная скорость натрия по высоте в половине ТВС

Потери давления в ТВС с МТ составляют 154 кПа, это в пять раз меньше по сравнению с потерей давления в штатной ТВС БН-800. Это обусловлено эффективным использованием пространства объема ТВС, а также принятым ограничением максимальной скорости натрия в коллекторах и приемлемой неравномерностью температуры теплоносителя.

### НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Расчеты проводились с помощью программного комплекса JARF [12], предназначенного для расчета нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах в многогрупповом диффузионном приближении для двумерных и трехмерных расчетных моделей при различных углах симметрии и геометрий расчетной модели в плане.

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

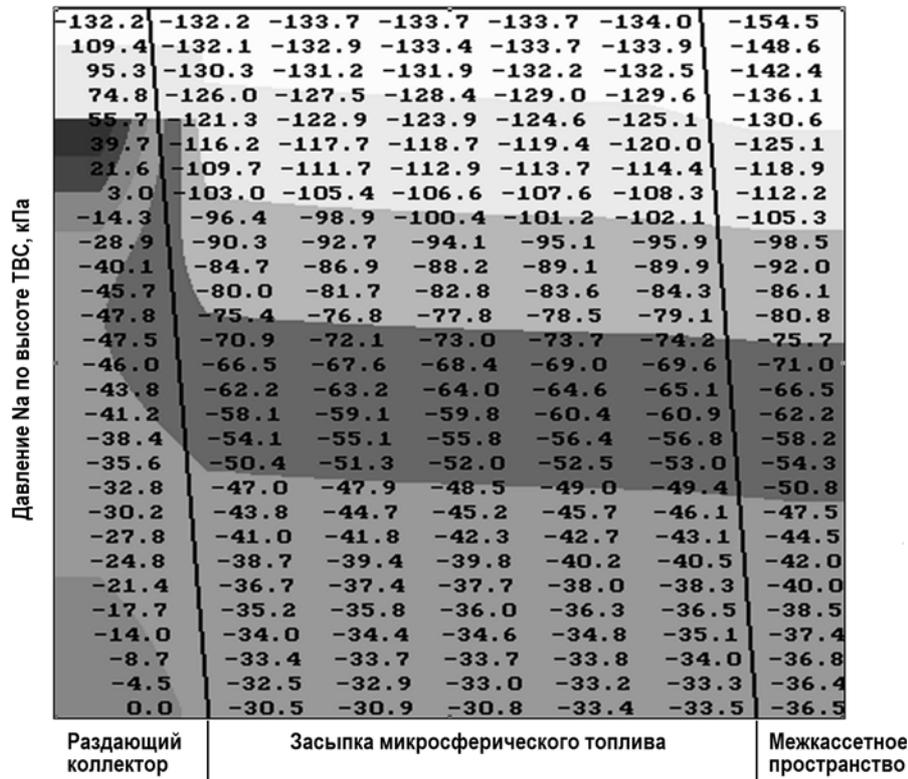


Рис. 4. Давление натрия по высоте в половине ТВС

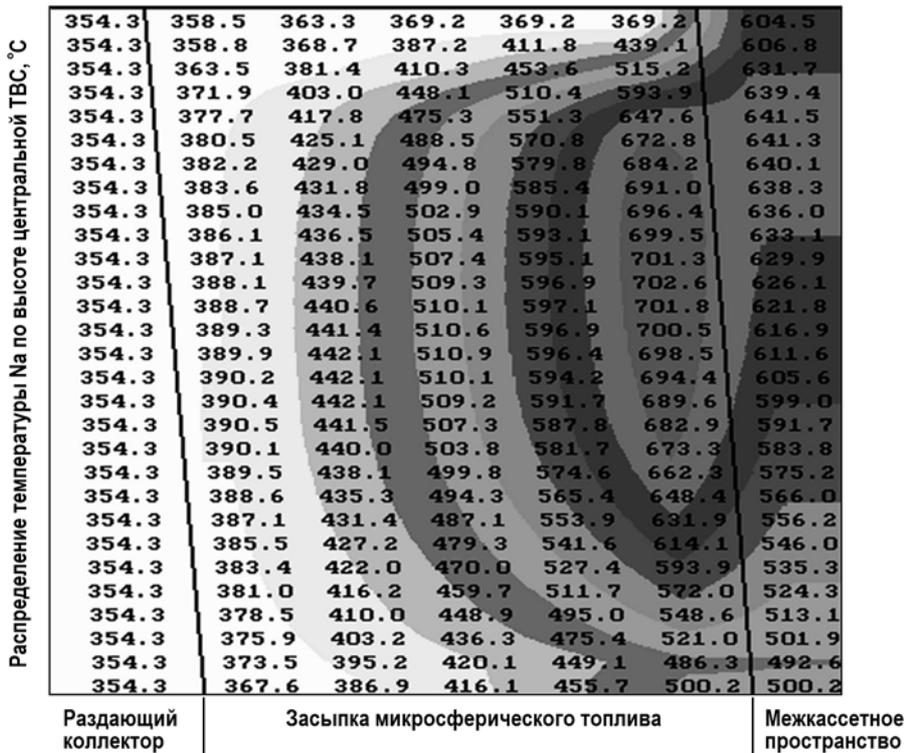


Рис. 5. Распределение температуры натрия по высоте в половине центральной ТВС

В расчетах варьировались высота активной зоны и содержание плутония в зонах низкого, среднего и большого его содержания в топливе для выбора варианта активной зоны с ТВС с МТ, характеристики которой соответствуют проектным значениям штатной активной зоны БН-800 со смешанным диоксидным топливом. По результатам вариантных расчетов был выбран вариант активной зоны с ТВС с МТ при содержании плутония в (U, Pu)С-топливе по подзонам 1, 2 и 3 соответственно 13.5, 15.5 и 18.5% и высоте активной зоны 90 см. Расчетная модель в R-Z-геометрии показана на рис. 6. Изотопный состав используемого плутония представлен в табл. 3.

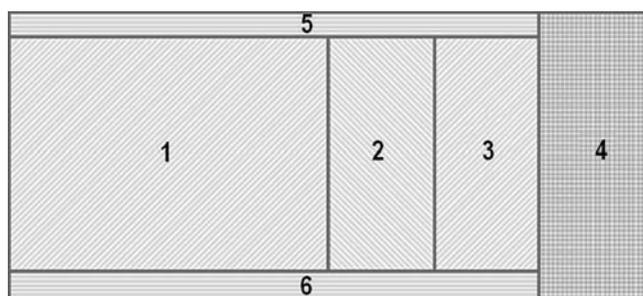


Рис. 6. Расчетная модель реактора в R-Z-геометрии: 1 - 3 – первая, вторая и третья подзоны активной зоны с разным содержанием плутония; 4 – боковая зона воспроизводства; 5, 6 – верхняя и нижняя торцевые зоны воспроизводства [12]

Таблица 3

**Изотопный состав используемого плутония**

| Изотоп        | Pu-239 | Pu-240 | Pu-241 | Pu-242 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| Содержание, % | 56     | 30     | 13     | 1      |

Оценен полный натриевый пустотный эффект реактивности для всего реактора, который получился отрицательным. Для определения самого большого возможного скачка реактивности за счет реализации пустотного (плотностного) эффекта был рассчитан вариант с опустошением центральной части ТВС по высоте с первого по одиннадцатый ряд ТВС, имеющих положительный натриевый пустотный эффект реактивности. Из-за конструктивной особенности ТВС с МТ в аварийной ситуации, в первую очередь, может вскипеть натрий, охлаждающий засыпку микросферического топлива. У натрия в подающем коллекторе температура ниже температуры кипения. Расчетная модель активной зоны реактора с МТ в плане представлена на рис. 7. В результате проведенного расчета получена оценка максимального положительного пустотного эффекта реактивности  $\sim 2.6\beta$  и был определен температурный коэффициент Доплера

$$\alpha_{\text{Доплер}} = - 1,09 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}.$$

При аварийном скачке температуры до  $1600^\circ\text{C}$  (максимальной рабочей температуры для оболочки микротоплива) и вскипании натрия отрицательный доплеровский эффект реактивности сможет скомпенсировать положительную реактивность  $\sim 2.7\beta$ .

Таким образом, в аварии с реализацией максимального положительного пустотного эффекта реактивности не произойдет разгона на мгновенных нейтронах.

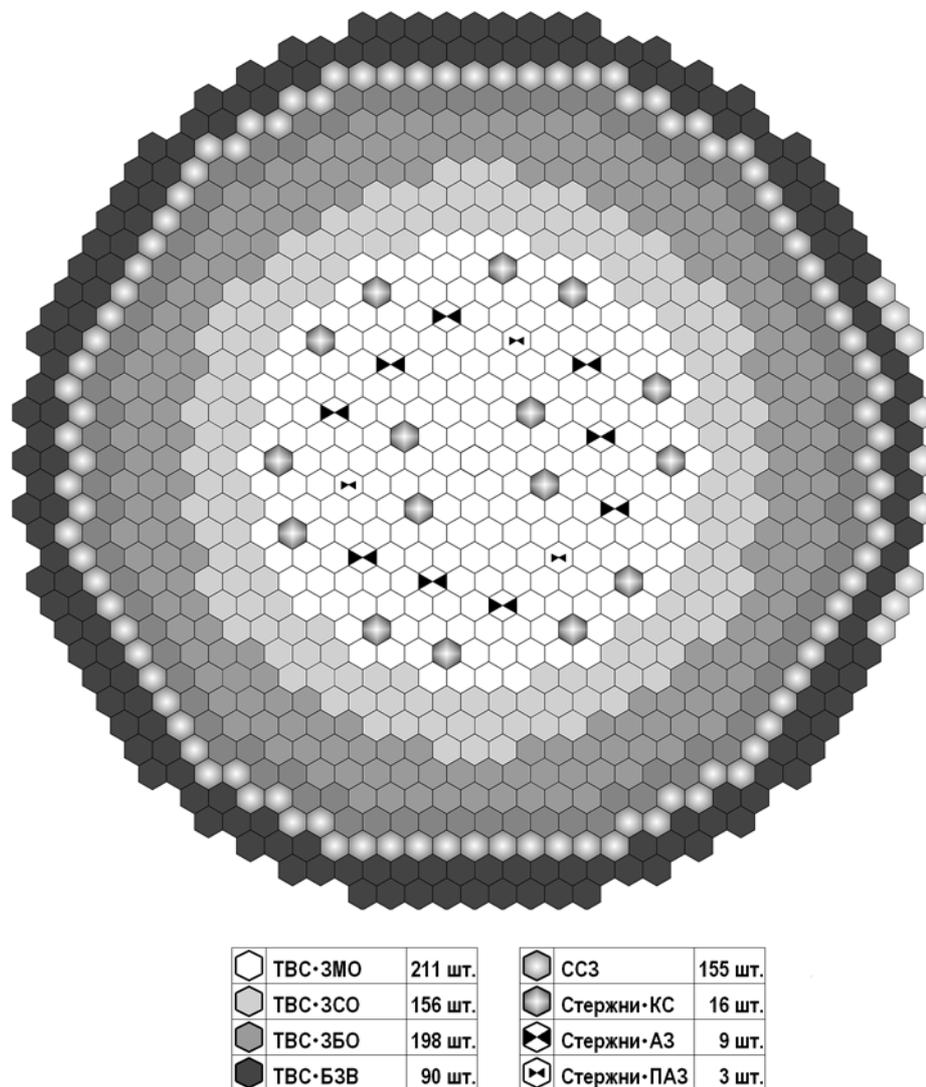


Рис. 7. Расчетная модель АЗ БН с МТ в плане (принята аналогичной БН-800 с полной загрузкой МОКС-топливом) [2]

В таблице 4 приведено сравнение основных характеристик БН-800 с микротвэльной загрузкой и БН-800 со штатной загрузкой МОКС-топливом.

Анализ результатов исследования [21] показал

- радикальное повышение радиационной безопасности реактора на быстрых нейтронах типа БН-800 в режимах тяжелых аварий с повышением температуры активной зоны с МТ;
- существенное улучшение характеристик топливного цикла ( $K_{\text{ВА}} \sim 1,0$ );
- уменьшение перепада давления (потери давления в ТВС уменьшаются в пять раз), снижение расхода мощности на прокачку теплоносителя и увеличение уровня естественной циркуляции теплоносителя при останове насосов;
- температурные ограничения оболочки МТ из карбида кремния превышают характерные для стальных оболочек, что позволяет существенно повысить параметры натрия в первом контуре реактора.

Таблица 4

**Сравнение основных характеристик БН-800 МТ и БН-800 МОКС**

| Параметр  | БН-800МТ           | БН-800 МОКС[3]     |
|---|--------------------|--------------------|
| Высота АЗ, мм   | 900                | 880                |
| Диаметр АЗ, м   | 2.56               | 2.56               |
| Загрузка микротвэльного топлива (таблеточного МОКС), т      | 16                 | 16.4               |
| Размер «под ключ», мм                                       | Низ 96/ верх 88.5  | 96                 |
| Содержание по плутонию в трех подзонах, %                   | 13.5 / 15.5 / 18.5 | 19.5 / 22.1 / 26.9 |
| Материал чехла ТВС  | ЭП-450             | ЭП-450             |
| Удельная загрузка по (239+241) плутонию на ГВт(э), кг       | 2183               | 2340               |
| Удельная избыточная наработка топлива на ГВт(э)-г, кг       | 190                | –                  |
| Кампания реактора, эфф. сут                                 | 155                | 140                |
| Кампания топлива, эфф. сут                                  | 465                | 420                |
| Коэффициент воспроизводства АЗ                              | 0.97               | 0.73               |
| Коэффициент воспроизводства реактора                        | 1.24               | 0.98               |
| Коэффициент неравномерности поля энерговыделения по радиусу | 1.17               | 1.22               |
| Среднее выгорание, % т.я.                                   | 6.6                | 6.4                |
| Максимальное выгорание, % т.я.                              | 9.8                | 9.8                |

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На примере БН-800 приведены результаты расчетных исследований в обоснование возможности использования ТВС с микросферическим (U, Pu)С-топливом в активной зоне быстрого натриевого реактора.

Благодаря использованию такого уникального вида топлива, обладающего развитой поверхностью теплоотвода и низкой постоянной твэла, а также конструктивному решению по поперечному охлаждению засыпки микросферического топлива в ТВС появляются дополнительные возможности для повышения внутренней самозащищенности и улучшения характеристик конкурентоспособности реакторов такого типа. Основными положительными моментами перехода на ТВС с микросферическим топливом являются

- повышение внутренней самозащищенности в аварийных режимах за счет развитой поверхности теплоотвода, низкой доли запасенного тепла, высокотемпературной стойкости МТ;

- улучшение нейтронно-физических характеристик за счет низкой температуры топлива, уменьшения количества стали в ТВС и использования высокотеплопроводного плотного смешанного карбидного топлива в замкнутом топливном цикле;

- увеличение коэффициента воспроизводства топлива в активной зоне и уменьшение запаса реактивности на выгорание.

Учитывая то, что расчетное исследование производилось в рамках имеющихся ограничений модели активной зоны реактора типа БН-800, можно утверждать, что существует возможность дальнейшей оптимизации и улучшения характеристик такого типа реактора. Также есть основания полагать, что благодаря такому типу топлива снижается вероятность выхода продуктов деления в первый контур в авариях с потерей теплоносителя и вводом положительной реактивности, так как оболочка микротвэлов может выдерживать более высокие температуры, чем стальная оболочка традиционных стержневых твэлов. Для экспериментального обоснования применения такого топлива в быстрых натриевых реакторах необходимо

- исследовать коррозию МТ в натрии;
- испытать МТ в исследовательском быстром реакторе при флюенсе  $10^{23}$  н/см<sup>2</sup>;
- исследовать коллекторный эффект на крупномасштабных моделях ТВС;
- исследовать механическое взаимодействие засыпки МТ с чехлами при термоматках в интервале температуры от 20 до 600°С;
- проработать термомеханическую модель поведения МТ в активной зоне БН.

Если экспериментальные исследования дадут положительные результаты, то можно ожидать больших эффектов с использованием ТВС с микротвэлами как при повышении внутренней самозащищенности и эффективности уже существующих БН, так и при разработке конструкции нового быстрого натриевого реактора [22].

### Литература

1. Сараев О.М., Носков Ю.В., Зверев Д.Л. и др. Обоснование проекта и состояние сооружения БН-800. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. Вып. 4. – С. 197-201.
2. Матвеев В.И., Хомяков Ю.С. Техническая физика быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. / Под ред. чл.-корр. РАН В.И. Рачкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – С. 195-208, 311-318.
3. Поплавский В.М., Кузнецов И.А. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. – М.: ИздАТ, 2012. – С. 243-272.
4. Новиков В.М., Слесарев И.С., Алексеев П.Н., Игнатъев В.В., Субботин С.А. Ядерные реакторы повышенной безопасности. Анализ концептуальных разработок. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.
5. Fast Reactor Database, IAEA TECDOC-1531. – Vienna, Austria, 2007. – 449 pp. Электронный ресурс: <https://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/7581/Fast-Reactor-Database-2006-Update> (дата доступа 21.09.2018).
6. Alekseev P.N., Balanin A.L., Fomichenko P.A. et al. Development of Conceptual Proposal for a Nuclear Facility with the Gas Cooled Fast Reactor BGR-1000 Using Coated Microfuel and Technologies of Light Water Reactors. Paper C106. In Proc. of the PHYSOR-2006 Int. Conference «Advances in Nuclear Analysis and Simulation». – Vancouver, BC, Canada, September 14-16, 2006. – PP. 1761-1764.
7. Alekseev P.N., Balanin A.L., Fomichenko P.A. et al. Physical and Technical Basics of the Concept of a Competitive Gas Cooled Fast Reactor Facility with the Core Based on Coated Fuel Microparticles. In Proc. of the Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles «Next Generation of nuclear systems for sustainable development (FR17)». IAEA-CN245-517. – Russia, Ekaterinburg, 26-29 June 2017. – P. 10. Электронный ресурс: [https://www.researchgate.net/publication/330480864\\_IAEA-CN245-205\\_IAEA\\_Study\\_on\\_Passive\\_Shutdown\\_Systems\\_for\\_Fast\\_Reactors\\_Status\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/330480864_IAEA-CN245-205_IAEA_Study_on_Passive_Shutdown_Systems_for_Fast_Reactors_Status_Review) (дата доступа 21.09.2018).
8. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Филиппов Г.А., Фальковский Л.Н., Гришанин Е.И. и др. Перспективы применения микротвэлов в ВВЭР. // Атомная энергия. – 1999. – Т. 86. – Вып. 6. – С. 443-449.
9. Филиппов Г.А., Фальковский Л.Н., Трубочев В.М., Фонарев Б.И., Мастюкин В.П., Кондитеров М.В., Момот Г.В. Коррозионная стойкость микротвэлов в воздушной среде с температурой до 1200°С при контакте с элементами тепловыделяющих сбос-

рок из аустенитных нержавеющей сталей. // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104. – Вып. 3. – С. 189-192.

10. Филиппов Г.А., Гришанин Е.И., Фальковский Л.Н., Фонарев Б.И., Денискин В.П., Курбаков С.Д., Трубачев В.М., Момот Г.В. Оценка стойкости защитных покрытий микротвэлов в парогазовой среде при взаимодействии с конструкционными материалами. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 106. – Вып. 3. – С. 153-158.

11. Гришанин Е.И., Кухаркин Н.Е. Инновация с микротвэлами. // РЭА. 2009. – № 9. – С. 30-36.

12. Ярославцева Л.Н. Комплекс программ JARB для расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1983. – Вып. 8 (37). – С. 41-43.

13. Сазыкина Т.А., Тихонов Н.И. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния и пути выбора оптимальной конструкции микротвэла высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. // ВАНТ. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология. – 1983. – Вып. 3 (16). – С. 74-76.

14. Дегальцев Ю.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Кузнецов В.Ф. Поведение высокотемпературного ядерного топлива при облучении. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 127-137.

15. Батулин В.Г. и др. Нейтронно-графические исследования структуры материалов твэлов ВТГР. // ВАНТ. Сер. Атомная техника и технология. – 1990. – Вып. 2. – С. 86-92.

16. Krautwasser P., Nickel H. Influence of Porosity on the Irradiation Performance of Pyrocarbon on the Irradiation Performance of Pyrocarbon Coatings. // Nucl. Technol. – 1977. – Vol. 35. – PP. 310-319.

17. Черников А.С., Пермяков Л.Н., Федик И.И., Гаврилин С.С., Курбаков С.Д. Твэлы на основе сферических топливных частиц с защитным покрытием для реакторов повышенной безопасности. // Атомная энергия. – 1999. – Т. 87. – Вып. 6. – С. 451-462.

18. Гришанин Е.И., Денисов Е.Е., Любин А.Я., Фальковский Л.Н. Разработка математической модели расчета параметров теплоносителя в тепловыделяющей сборке легководно-реактора с микротвэлами. // Тяжелое машиностроение. – 1995. – № 9. – С. 11-20.

19. Филиппов Г.А., Меламед Л.Э., Тропкин А.И. Методика математического моделирования и анализ гидродинамики систем, содержащих засыпки и перфорированные перегородки, на основе вычислительного комплекса ANSYS. // Известия вузов. Проблемы энергетика. – 2005. – № 11-12. – С. 64-79.

20. Филиппов Г.А., Меламед Л.Э., Тропкин А.И. Влияние формы и размеров коллекторов на гидравлическое сопротивление коллекторных систем с засыпками. // Известия вузов. Проблемы энергетика. – 2007. – № 1-2. – С. 8-20.

21. Maslov N.V., Grishanin E.I., Alekseev P.N. Improving Inherent Safety BN-800 by the Use of Fuel Assembly with (U, Pu)C Microfuel. Proc. of the Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: «Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development». FR-17.IAEA-CN245-303. – 2017. Электронный ресурс: <https://conferences.iaea.org/indico/event/126/contributions/3676/> (дата доступа 21.09.2018).

22. Маслов Н.В., Фонарев Б.И., Гришанин Е.И., Алексеев П.Н. Ядерный реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Патент РФ на изобретение № 2668230. – 2018.

Поступила в редакцию 01.10.2018 г.

#### Авторы

**Маслов** Николай Владимирович, аспирант  
E-mail: nikolay.mail@yandex.ru

**Гришанин** Евгений Иванович, в.н.с.  
E-mail: evgrishanin@yandex.ru

**Алексеев** Павел Николаевич, научный руководитель Курчатовского комплекса перспективной атомной энергетика  
E-mail: Alekseev\_PN@nrcki.ru

## THE POSSIBILITY OF IMPROVING INHERENT SAFETY BN-800 BY THE USE OF FUEL ASSEMBLY WITH (U, Pu)C MICROFUEL

Maslov N.V. \*, Grishanin E.I. \*\*, Alekseev P.N. \*\*

\* NRNU MEPhI

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia,

\*\* NRC «Kurchatov Institute»

1 Akademik Kurchatov sq. 1, Moscow, 123182, Russia,

### ABSTRACT

The task undertaken in the report is to increase inherent safety of the fast reactor with a sodium coolant of type BN-800 due to considering the possibility of using innovation fuel assemblies with mixed uranium-plutonium carbide fuel in form of coated particles. Fuel assemblies with pellet MOX fuel and fuel rods are directly replaced by microspherical mixed (U,Pu)C-fuel. Calculation evaluations of characteristics of fuel assemblies with microspherical fuel are realized.

A calculation comparison of neutron physics and thermal hydraulics characteristics of the innovation fuel assemblies with microspherical mixed (U,Pu)C-fuel and the traditional fuel assemblies with pellet MOX fuel and fuel rods was conducted.

The main positive moments of conversion to fuel assemblies (FA) with microspherical fuel are:

- increase of inherent safety in emergencies due to developed surface of heat removal, low part of stored heat and microfuel high temperature resistance.
- improvement of neutronics characteristics due to low fuel temperature, decrease of steel quantity in FA and use of highly heat conducting dense mixed carbide fuel in the closed fuel cycle.
- increase of fuel breeding ratio and decrease of reactivity margin; it is possible to optimize and improve these parameters further taking into consideration that study was conducted within the framework of BN-800 reactor core.

The chosen calculation model was BN-800 reactor core with MOX fuel, where a three-zone radial power density field flattening due to plutonium content change in fuel was used.

Thanks to microspherical carbide fuel, inherent safety of the reactor increases in accidents with loss of coolant flow and introduction of positive reactivity because the coated particles have developed heat-exchange surface and their coats are able to keep fission products at higher temperatures than the steel cladding of traditional fuel rods.

**Key words:** inherent safety, fast sodium reactors, microfuel, coated particles, microspherical fuel, fuel assemblies with coated particles, tolerant fuel, mixed carbide fuel.

### REFERENCES

1. Saraev O.M., Noskov Yu.V., Zverev D.L., Vasil'ev B.A., Sedakov V.Yu., Poplavskiy V.M., Tsiboulia A.M., Ershov V.N., Znamensky S.G. BN-800 Design Validation and Construction Status. *Atomnaya Energiya*, 2010, v. 108, no. 4, pp. 197-201 (in Russian).
2. Matveev V.I., Homyakov Y.S. *Technical Physics of Fast Reactors with Sodium Coolant*. Moscow. Izdatel'skiy dom MEI Publ., 2012, pp. 195-208, 311-318 (in Russian).
3. Poplavskiy V.M., Kyznetsov I.A. *Safety of NPP with fast neutron specter*. Moscow. IzdAT Publ., 2012, pp. 243-272 (in Russian).

4. Novikov V.M., Slesapev I.S., Alekseev P.N., Ignatev V.V., Subbotin S.A. *Nuclear Reactors Enhanced Safety. Analysis of Conceptual Development*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1993, 384 p. (in Russian).
5. Fast Reactor Database, IAEATECDOC-1531. Vienna, Austria, 2007, 449 p. Available at: <https://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/7581/Fast-Reactor-Database-2006-Update> (accessed Sep. 21, 2018).
6. Alekseev P.N., Balanin A.L., Fomichenko P.A., Grishanin E.I., Ivanov E.A., Ponomarev A.S., Zakharko Yu.A. *Development of Conceptual Proposal for a Nuclear Facility with the Gas Cooled Fast Reactor BGR-1000 Using Coated Microfuel and Technologies of Light Water Reactors*. Paper C106. In Proc. of the PHYSOR-2006 Int. Conf. «Advances in Nuclear Analysis and Simulation». Vancouver, BC, Canada, September 14-16, 2006, pp. 1761-1764.
7. Alekseev P.N., Balanin A.L., Fomichenko P.A., Grishanin E.I., Ponomarev A.S., Sedov A.A., Zakharko Yu.A. *Physical and Technical Basics of the Concept of a Competitive Gas Cooled Fast Reactor Facility with the Core Based on Coated Fuel Microparticles*. In Proc. of the Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles. «Next Generation of Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)». IAEA-CN245-517. Russia, Ekaterinburg, 26-29 June 2017. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/330480864\\_IAEA-CN245-205\\_IAEA\\_Study\\_on\\_Passive\\_Shutdown\\_Systems\\_for\\_Fast\\_Reactors\\_Status\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/330480864_IAEA-CN245-205_IAEA_Study_on_Passive_Shutdown_Systems_for_Fast_Reactors_Status_Review) (accessed Sep. 21, 2018).
8. Ponomarev-Stepnoy N.N., Kuharkin N.E., Filippov G.A., Phalkovski L.N. Grishanin E.I. Prospects for the use Microfuel in the VVER. *Atomnaya Energiya*, 1999, v. 86, no. 6, pp. 443-449 (in Russian).
9. Filippov G.A., Phalkovski L.N. Trybachev V.M., Fonarev B.I., Mastykin V.P., Konditerov M.V., Momot G.V. Corrosion Resistance of Microfuel in Air with a Temperature of up to 1200°C in Contact with the Elements of the Fuel Output From Their Assemblies Made of Austenitic Stainless Steel. *Atomnaya Energiya*, 2008, v. 104, no. 3, pp. 189-192 (in Russian).
10. Filippov G.A., Grishanin E.I., Falkovskiy L.N., Fonarev B.I., Deniskin V.P., Kyrbakov S.D., Trybachev V.M., Momot G.V. Evaluation of the Stability of Protective Coatings on Microfuel in a Vapor-Gas Medium with Interaction with Structural Materials. *Atomnaya Energiya*, 2009, v. 106, no.3, pp. 153-158 (in Russian).
11. Grishanin E.I., Kyharkin N.E., Innovation with Microfuel. *REA*, 2009, no. 9, pp. 30-36 (in Russian).
12. Yaroslavtseva L.N. Program system JARB for calculation neutron physics of the reactors. *VANT. Ser. Fizika i Tekhnika Yadernykh Reaktorov*, 1983, no. 8 (37), pp. 41-43 (in Russian).
13. Sazikina T.A., Tihonov N.I. Studies of the Stress-Strain State and the Ways of Choosing the Optimal Design of a Microfuel Elements for High-Temperature Gas-Cooled Reactors. *VANT. Ser. Atomno-Vodorodnaya Energetika i Tekhnologiya*, 1983, no. 3 (16), pp. 74-76 (in Russian).
14. Degalcev Y.G., Ponomarev-Stepnoy N.N., Kuznetsov V.F. *Behavior of High-Temperature Nuclear Fuel During Irradiation*. Moscow. Energoizdat Publ., 1987, pp. 127-137 (in Russian).
15. Baturin V.G., Zelenyuk F.M. Neutronographical Studies of Structure Microfuel Materials. *VANT. Ser. Atomnaya Tekhnika i tekhnologiya*, 1990, no.2, pp. 86-92 (in Russian).
16. Krautwasser P., Nickel H. Influence of Porosity on the Irradiation Performance of Pyrocarbon on the Irradiation Performance of Pyrocarbon Coatings. *Nucl. Technol.*, 1977, v. 35, pp. 310-319.
17. Chernikov A.S., Permyakov L.N., Fedik I.I., Gavrilin S.S., Kurbakov S.D. Spherical Fuel Particles with a Protective Coating for High-Security Reactors. *Atomnaya Energiya*, 1999, v. 87, no. 6, pp. 451-462 (in Russian).

18. Grishanin E.I., Denisov E.E., Lyubin A.Ya., Falkovskiy L.N. Development the Mathematical Model for Calculating Parameters of the Coolant in the Fuel Assembly of a light-Water Reactor with Microfuel. *Tyazhyoloe Mashinostroenie*, 1995, no. 9, pp. 11-20 (in Russian).

19. Philipov G.A. Melamed L.E. Tropkin. A.I. Methodology of Mathematic Simulation and Analysis of Hydro-Dynamics for Systems Containing Pebble Beds and Perforate Walls, on the Basis of CAE System ANSYS. *Izvestiya Vuzov. Problemy Energetiki*, 2005, no. 11-12, pp. 64-79 (in Russian).

20. Philipov G.A. Melamed L.E. Tropkin. A.I. Influence of Headers Form and Sizes to Hydraulic Resistance of Header Devices with Pebble Beds. *Izvestiya Vuzov. Problemy Energetiki*, 2007, no. 1-2, pp. 8-20 (in Russian).

21. Maslov N.V., Grishanin E.I., Alekseev P.N. Improving inherent safety BN-800 by the use of fuel assembly with (U, Pu)C microfuel. Proc. of the Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: «Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development». FR-17.IAEA-CN245-303, 2017. Available at: <https://conferences.iaea.org/indico/event/126/contributions/3676/> (accessed Sep. 21, 2018).

22. Maslov N.V., Fonarev B.I., Grishanin E.I., Alekseev P.N. *Fast Neutron Nuclear Reactor with Liquid Metal Coolant*. Russian Federation Patent for the Invention No. 2668230, 2018 (in Russian).

#### Authors

Маслов Николай Владимирович, аспирант

E-mail: nikolay.mail@yandex.ru

Гришанин Евгений Иванович, в.н.с.

E-mail: evgrishanin@yandex.ru

Алексеев Павел Николаевич, научный руководитель Курчатовского комплекса перспективной атомной энергетики

E-mail: Alekseev\_PN@nrcki.ru