

Перспективный твэл с легированным свинцом в контактном слое для реактора БРЕСТ-ОД-300

Д. А. Федорович, Е. В. Игнатьева, И. Л. Парамонова

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого
fedorovich.dasha.99@mail.ru, elig1359@yandex.ru, i-p-lev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается температурное поле твэл, в котором газовый зазор заменен контактными слоями Pb-Mg-Zr, в режиме полного обесточивания энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300, в перспективе обеспечивающего замкнутый ядерный топливный цикл и чистую энергетику.

Ключевые слова: БРЕСТ-ОД-300; естественная безопасность; замкнутый ядерный топливный цикл; контактный слой твэл; свинец; эвтектика; ШНУП-топливо; обесточивание

I. ВВЕДЕНИЕ

С ростом энергопотребления и климатическими изменениями, госкорпорация «Росэнергоатом» представила концепцию «зеленого квадрата», которая подразумевает переход на безуглеродные источники энергии и необходимость ускоренного развития атомной и гидроэнергетики, а также энергетики ветра и солнца. Атомные станции не выбрасывают углекислый газ в атмосферу, не так сильно зависят от внешних факторов, как возобновляемые источники, не ограничены ресурсом рек, как гидроэлектростанции. Более того, атомная энергетика самая энергоёмкая. Тем не менее, ресурс урана и тория исчерпаем, а значит требуется переработка ядерного топлива и замыкание топливного цикла.

Реакторная установка БРЕСТ-ОД-300, строительство которой уже начато в г. Северск Томской области, является частью проекта «Прорыв», который направлен на замыкание ядерного топливного цикла на базе реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Этот быстрый реактор, безопасность которого обеспечена естественным протеканием процессов в свинцовом теплоносителе и высокоплотном смешанном нитридном уран-плутониевом (ШНУП) топливе, отнесен к IV поколению и в перспективе может стать тем самым чистым и энергоёмким источником энергии с собственным топливообеспечением.

На базе Сибирского химического комбината (СХК) для реакторной установки (РУ) БРЕСТ предусмотрен модуль переработки отработавшего ШНУП-топлива и модуль фабрикаци и рефабрикаци для изготовления твэлов стартовой загрузки, а впоследствии и твэлов из отработавшего топлива (ОЯТ). Само ШНУП-топливо – это керамическая смесь монокрида отвалного урана и монокрида плутония. Таким образом, данный «пристанционный» топливный цикл будет использовать по большей части уже наработанное топливо и позволит включить обратно в цикл обедненный уран. Захоронения радиоактивных отходов сведены к минимуму и не нарушают радиоактивного баланса Земли. Более того, в реакторе БРЕСТ-ОД-300 также будут «дожигаться» минорные актиниды, обладающие высокой радиоактивностью, а их захоронение и обращение с ними представляют большую проблему из-за их высокой

токсичности. Преимуществом «пристанционного» цикла также является минимизация перемещения ядерных материалов, что, безусловно, уменьшает радиоактивный след от атомной станции.

Когда говорят об АЭС как о чистом источнике энергии, подразумевают так же и ее высокую безопасность. Слабая замедляющая способность свинца позволяет раздвинуть решетку твэлов и увеличить проходное сечение свинцового теплоносителя, а его совместное использование со ШНУП-топливом обеспечивает малый и стабильный запас реактивности, именно поэтому принцип естественной безопасности исключает аварии с потерей отвода тепла и аварии с неконтролируемым ростом мощности. Высокая температура плавления свинца (около 300°C) не требует высокого давления в контуре, более того, свинец инертен по отношению к воде и воздуху, ШНУП-топливо считается толерантным (ATF – Accident Tolerant Fuel), так как его и так высокая теплопроводность с ростом температуры также растет, в отличие от того же диоксида урана, а интегральная компоновка позволяет локализовать течи и сделать осушение активной зоны невозможным. Все вышперечисленные особенности РУ БРЕСТ-ОД-300 фактически исключают радиоактивное загрязнение среды в результате аварии.

Тем не менее, в твэлах с газовой прослойкой между оболочкой и топливом, особенно при высоких выгораниях, рабочий ресурс твэлов зачастую определяется наступлением контакта между оболочкой и топливом. Исключить термомеханическое воздействие топливного сердечника и конструкционного материала, а также уменьшить выход газообразных продуктов деления, следовательно, и их давление на оболочку, позволило бы использование эвтектического внутритвэльного контактного слоя на основе свинца. Использование прослойки из металла приводит к уменьшению количества запасенной в топливе энергии из-за высокой (особенно в сравнении с гелием) теплопроводности эвтектики, что в случае срыва принудительной циркуляции приведет к более благоприятным последствиям.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для реактора БРЕСТ могут рассматриваться натриевый и свинцовый контактный слой. В случае с натрием присутствует пустотный эффект реактивности и возможность кипения, чистый свинец также непригоден для данной задачи, так как, как было выяснено в ходе экспериментального облучения в реакторе БОР-60, данный материал вызывает коррозию оболочки твэл. Таким образом, поиск материала для решения конкретной задачи остается актуальной проблемой. Для исключения коррозионных процессов, в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» было предложено легировать свинец, например, магнием и

цирконием. В АО «ВНИИНМ» было предложено легировать свинец элементами конструкционного материала оболочки твэл – стали ЭП-823-Ш, там же были проведены послереакторные исследования данных твэлов, облученных в реакторе БОР-60 в экспериментальной сборке ЭТВС-4. Полученные результаты подтверждают эффективность легирования свинцового контактного слоя компонентами ЭП-823-Ш, однако требуются дополнительные исследования альтернативных легирующих компонентов [1]. Для дальнейших расчетов рассмотрен твэл с теплопроводной прослойкой из сплава на основе свинца, легированного 2,25% Mg-до 0,2% Zr. При использовании данного материала, на поверхности конструкционного материала образуется карбонитрид циркония в эвтектике на основе свинца с содержанием магния и циркония, который обеспечивает антикоррозионную защиту, создавая дополнительный барьер для азотирования стали и способствует «самозалечиванию» мелких повреждений покрытия [2].

Система свинец-висмут предусмотрена в качестве теплоносителя в проекте реактора СВБР-100, в котором материалом оболочки твэл также выступает ЭП-823-Ш, однако теплопроводность данной системы слабо отличается от теплопроводности свинцово-магниево-циркониевого сплава, поэтому для тепловой задачи рассмотрение эвтектики Pb-Bi не столь принципиально, тем более в отсутствие экспериментальных данных о пригодности данного материала в качестве контактного слоя в твэле реактора БРЕСТ-ОД-300.

III. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В ходе работы был выполнен расчет, в результате которого было получено распределение температур по высоте активной зоны в самом энергонапряженном твэле при работе реактора на номинальной тепловой мощности 700 МВт. Рассматривался предусмотренный проектом твэл с гелиевым зазором и аналогичный ему твэл со свинцовой эвтектикой с добавлением магния и циркония. Максимальная температура в центре топлива твэла со свинцовой эвтектикой составила 785,50°C, в то время как для аналогичного твэла с гелиевым контактным слоем максимальная температура в центре топливного сердечника составила порядка 1150°C. Перепад температур в пространстве между сердечником и оболочкой твэл в результате замены гелия на эвтектику уменьшился почти в 50 раз: с 423,58°C до 8,51°C, что уже свидетельствует об эффективности данного решения.

Далее рассмотрен сценарий с полным обесточиванием – отключением 4 главных циркуляционных насосов и прекращением подачи питательной воды при работе на исходной номинальной мощности. Анализ данного сценария (рис. 1) представлен для активной зоны, предусмотренной проектом, то есть зазор между оболочкой твэл и топливом заполнен гелием [3].

По графикам рис. 1. видно, что в момент установления естественной циркуляции теплоносителя (примерно 70 секунд от обесточивания) тепловая мощность снижается с 700 до 189 МВт, а расход до одной десятой доли, то есть до 4170 кг/с, средняя температура теплоносителя на входе в активную зону и на выходе из нее составляет 420°C и 775°C соответственно. Скорость циркуляции теплоносителя составила 0,21 м/с.

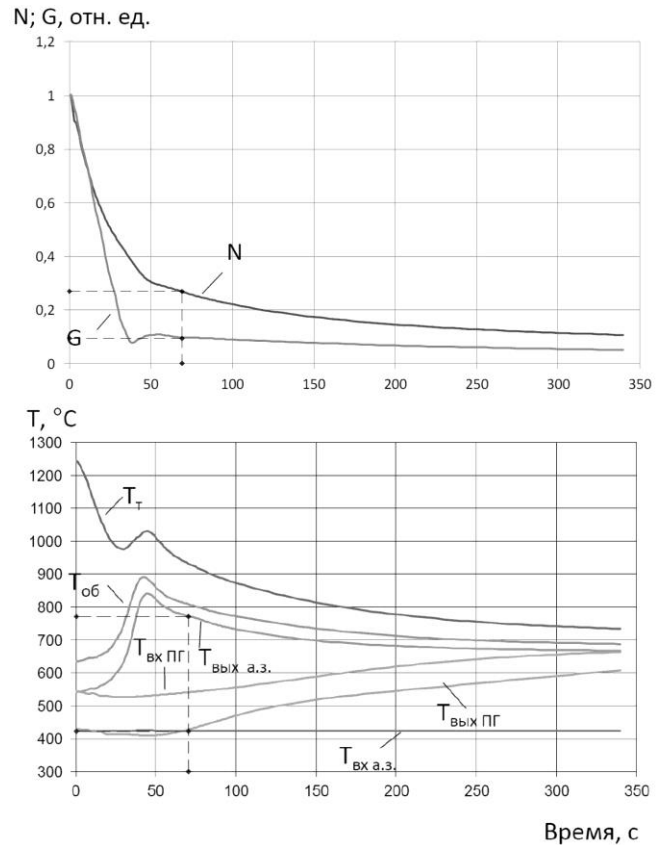


Рис. 1. Изменение параметров согласно сценарию с полным обесточиванием энергоблока [3]

Таким образом, проведен расчет для самого энергонапряженного твэла, где температура теплоносителя в зависимости от высотной отметки определялась как:

$$T_{m/n}(z) = T_{ax} + \Delta T / 2 \times (1 + \sin(\pi z / H_{эф}) / \sin(\pi H_{аз} / (2H_{эф}))),$$

где $T_{вх}$ – температура теплоносителя на входе в активную зону, °C; ΔT – разность температур теплоносителя на входе в активную зону и на выходе из нее, °C; $H_{аз}$ – высота топливного столба активной зоны, мм; $H_{эф} = H_{аз} + 2\delta_{эф}$ – высота активной зоны с учетом эффективной добавки, равной 200 мм, мм.

Конвективный теплообмен между оболочкой твэл и теплоносителем определяется по закону Ньютона, тогда для последующего расчета температуры снаружи оболочки необходимо определить коэффициент теплоотдачи.

На основе проведенных А.В. Жуковым экспериментальных исследований теплогидравлических характеристик реакторов типа БРЕСТ, была получена формула [4]:

$$\alpha = Nu \times \lambda / d =$$

$$= (7,55 \times S/d - 14 \times (S/d)^{-5} + 0,007 Pe^{0,64+0,246 S/d}) \times \lambda / d,$$

где S/d – относительный шаг решетки твэлов; $Pe = wd/a$ число Пекле, w – скорость теплоносителя, λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К).

Для определения температур внутри оболочки твэл, снаружи и в центре топливной таблетки был выполнен итерационный расчет. Температура в центре топливной таблетки определяется как:

$$T_{таб}^u(z) = T_{об}^u(z) + q_l(z) \times (R_{об}(z) + R_z(z) + R_{таб}(z)),$$

где $T_{об}^u(z)$ – температура снаружи оболочки, °С; $q_l(z)$ – линейная плотность теплового потока, кВт/м; $R_{об}(z)$ – термическое сопротивление оболочки, м·К/Вт; $R_z(z)$ – термическое сопротивление зазора, м·К/Вт; $R_{таб}(z)$ – термическое сопротивление топливной таблетки, м·К/Вт.

Термические сопротивления зависят от геометрии и теплопроводности, которая в свою очередь определяется при средних температурах в оболочке, зазоре и топливе. Из-за этого возникает необходимость проведения нескольких итераций для получения точных значений температуры в центре топливной таблетки.

В результате было получено распределение температур по высоте активной зоны в случае с твэлом с эвтектикой в контактном слое после установления естественной циркуляции в случае обесточивания (рис. 2).

Стоит отметить, что данный расчет поля температур твэл является скорее оценочным, так как в случае с твэлом со сплавом на основе свинца, легированного 2,25% Mg – до 0,2% Zr в контактном слое, параметры изменятся, так как в топливе будет аккумулироваться существенно

меньше энергии и теплоотвод будет более интенсивным, а значит скорость и расход теплоносителя увеличатся. Тем не менее, в центре топливной таблетки максимальная температура составляет около 815°С, в то время как для гелиевого твэла, судя по рис. 1, она равна примерно 950°С. Судя по эквидистантности линий на рис. 2, можно судить о том, что градиент температур в твэле с эвтектикой уменьшается. Для проверки этой гипотезы было выполнено численное моделирование.

Рассмотрен участок, соответствующий выходу из активной зоны, где температура топлива наибольшая. На рис. 3(а) и 3(б) представлен результат численного моделирования в ПО Ansys твэла с гелием, температура в центре топлива равна 842°С, перепад температур в зазоре – 40°С. На рис. 3(в) и 3(г) результат аналогичного моделирования для твэла с эвтектикой, в центре – 805°С, перепад в контактном слое составил 2°С. Таким образом, действительно, градиент температур снижается, что приводит к уменьшению термических сопротивлений, сглаживает нейтронно-физические характеристики (температурный и плотностной эффект реактивности становятся меньше) и снижает количество энергии, аккумулируемой в топливе.

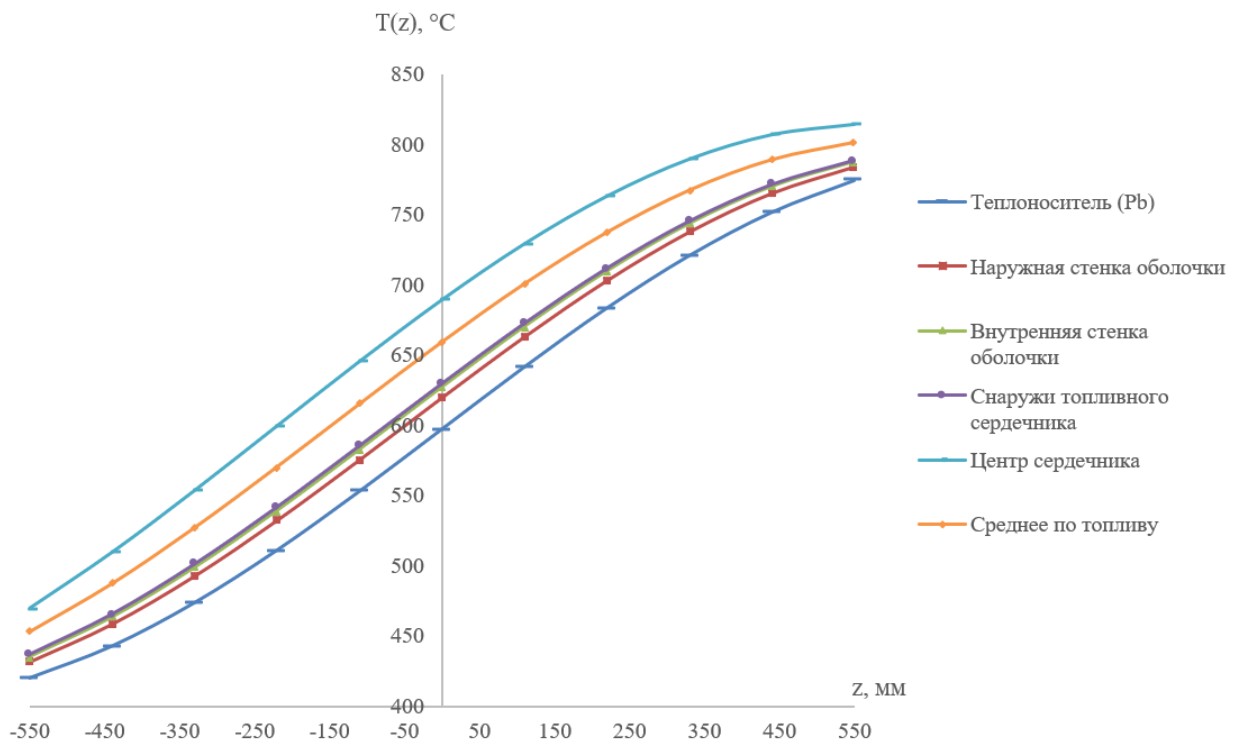


Рис. 2. Распределение температур по высоте активной зоны самого энергонапряженного твэла с эвтектикой в контактном слое

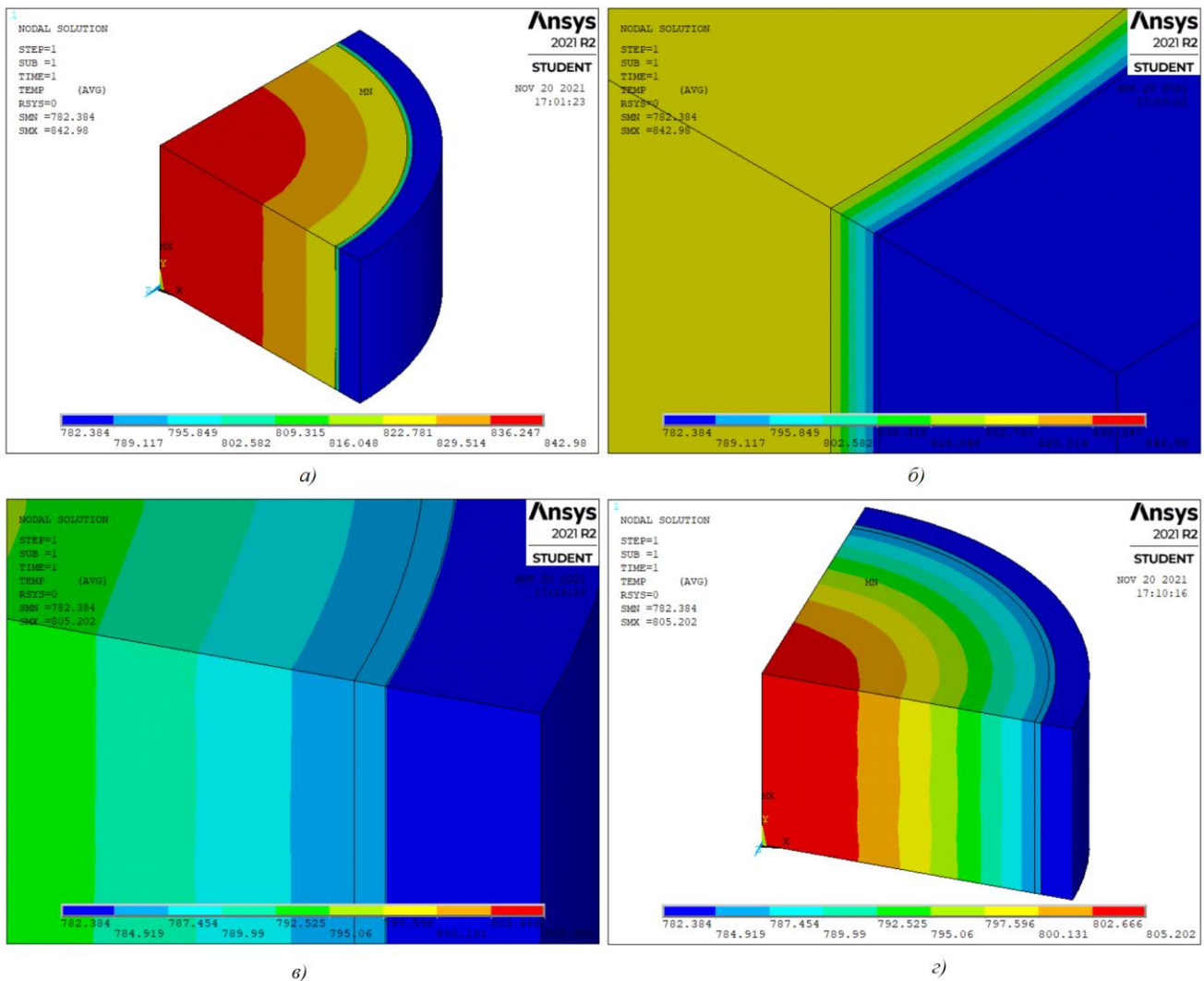


Рис. 3. Результаты численного моделирования полей температур твэлов с различными материалами в контактном слое ((а) твэл с гелием; б) градиент температур в гелиевом зазоре; в) контактный слой с эвтектикой Pb-Mg-Zr; г) твэл со свинцовой эвтектикой)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы, используемые для активной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300, так или иначе, обладают некоторыми отличительными особенностями для обеспечения естественной безопасности. Однако гелий в зазоре между топливным сердечником и оболочкой твэла приводит к аккумуляции тепла в топливе, хоть и выполняет свои основные функции – компенсирует изменение размеров топлива при распухании и обеспечивает выход газообразных продуктов деления. Все те же функции, согласно послереакторным исследованиям [1], выполняет и контактный слой из легированного свинца. Более того, эвтектический контактный слой не только обеспечивает выход газообразных продуктов деления, но и уменьшает его интенсивность, и, как следствие, давление продуктов деления на оболочку, а также уменьшает скорость распухания самого топлива [5]. По мнению разработчиков твэла с теплопроводной прослойкой из сплава на основе свинца, легированного 2,25% Mg-до 0,2% Zr, данные легирующие компоненты позволяют достичь самого низкого уровня коррозионной повреждаемости оболочки [2]. В данной работе было показано, что замена гелия на более теплопроводный материал снижает максимальную температуру в центре топлива при работе на номинальной мощности с 1150°C до 785,50°C, а перепад температур между оболочкой и топливным сердечником в 50 раз: с

423,58°C до 8,51°C. Из результатов численного моделирования следует и уменьшение градиента температур, из чего, в свою очередь, следует уменьшение температурных напряжений и увеличение рабочего ресурса твэла. На рис. 3(б) можно увидеть, что в тонком гелиевом зазоре перепад температур больше, чем в топливе и, тем более, в оболочке. Для аварийного случая обесточивания с отключением четырех главных циркуляционных насосов и прекращением подачи питательной воды при работе на исходной мощности, снижение температуры еще более важно: в таком случае, согласно выполненному оценочному расчету, в центре топливной таблетки максимальная температура составляет около 815°C, в то время как для гелиевого твэла, судя по рис. 1, она равна примерно 950°C. Так как температура топлива и остальных элементов активной зоны влияет в том числе и на нейтронно-физические характеристики реактора, а именно на изменение его реактивности, то использование твэла со свинцово-магниево-циркониевым подслоем, позволит достичь благоприятного исхода в результате обесточивания. Температуры плавления топлива и оболочки в данном случае не достигаются, температура кипения свинца составляет больше 2000°C, поэтому кризисы теплообмена при средней температуре теплоносителя 775°C на выходе из активной зоны, исключены.

Таким образом, внедрение в активную зону реактора БРЕСТ-ОД-300 твэла с жидкометаллическим подслоем, существенно увеличивает его безопасность и уменьшает вероятность выхода радиоактивных веществ и загрязнения среды в результате аварии. Возможность замыкания ядерного топливного цикла, отсутствие выбросов парниковых газов и безопасность делают атомную энергетику одной из самых перспективных и безвредных для экологии.

V. ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для уточнения данного оценочного расчета при обесточивании энергоблока, стоит отдельно рассмотреть установление естественной циркуляции в активной зоне с твэлами с эвтектикой в контактном слое, учитывая и работу пассивной системы безопасности с воздушными теплообменниками. Также следует учесть влияние прослойки из свинца на нейтронно-физические процессы в реакторе: на коэффициенты неравномерности, реактивность.

Безусловно, для дальнейшей разработки твэла с жидкометаллической прослойкой, необходимы и новые результаты экспериментов, так как с точки зрения теплофизики, все материалы на основе свинца дают одинаково эффективное снижение температур, но нужно учитывать множество факторов. Важны совместимость материалов с топливом и оболочкой, воздействие ионизирующего излучения на них, например, свинцово-висмутовая прослойка имеет потенциальный недостаток в виде преобразования висмута в полоний, имеющего высокую радиоактивность, что может затруднить переработку топлива.

Расчет экономичности данной прослойки неоднозначен и у разных экспертов дает противоречивые

результаты. Сложно оценить экономическую выгоду от данного типа твэл и ввиду того, что существует ряд проблем при его изготовлении: большая вязкость свинца, отсутствие методов автоматизации изготовления твэлов и технологий ремонта твэлов при наличии отклонений, а также методов контроля сплошности внутритвэльного подслоя. Необходимы и исследования преимуществ эвтектического контактного слоя с учетом оптимизации активной зоны и уменьшения потребления топлива вследствие повышения его выгорания и коэффициента использования установленной мощности, с одной стороны, и усложнения технологии изготовления твэлов, с другой [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Адамов Е.О., Забудько Л.М., Мочалов Ю.С., Рачков В.И., Хомяков Ю.С., Крюков Ф.Н., Скупов М.В. Разработка твэла с нитридным уран-плутониевым топливом с жидкометаллическим подслоем // Атомная энергия. 2019. Т.127, вып.5.
- [2] Орлова Е.А., Круглов А.Б., Чуваев Д.В., Стручалин П.Г., Загребяев С.А., Жмурич В.Г. Тепловые характеристики твэла со свинцово-магниевым подслоем // Ядерно-реакторные константы. 2016, вып.4.
- [3] Моисеев А.В., Реакторная установка БРЕСТ-ОД-300. Основные результаты расчетно-экспериментального обоснования безопасности// Проектное направление «Прорыв»: результаты реализации новой технологической платформы ядерной энергетики. 2015.
- [4] Безносков А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике. М.: ИздАТ, 2007 г. 343 с.
- [5] Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Беяева А.В., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н., Гильмутдинов И.Ф., Козолуп А.Н., Сагалов С.С., Скупов М.В., Иванов Ю.А. Особенности радиационного распухания нитридного уран-плутониевого топлива в экспериментальных твэлах с гелиевым и свинцовым подслоем // Атомная энергия. 2020. Т.129, вып.5.