

УДК 621.039.51

PACS 28.52.Nh

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЧЕРЕЗ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ИВВ-2М. ЧАСТЬ 1

Русских И.М.¹, Селезнев Е.Н.¹, Зырянова А.А., Волчихина Ю.В.¹, Аристов Н.М.

(АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Свердловская обл.),

Калашников Н.С., Горячих А.В., Кравцова О.А.

(АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала», г. Москва),

Ташлыков О.Л.

(ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

Контакты: Иван Михайлович Русских; IMRusских@rosatom.ru

Актуальность. Одно из основных условий безопасности эксплуатации тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне гетерогенного ядерного реактора ИВВ-2М (исследовательского водо-водяного) бассейнового типа — отсутствие поверхностного кипения на оболочке твэлов (под слоем отложений). Знание значений расхода теплоносителя через ТВС позволит прогнозировать его температуру на выходе из ТВС на кампанию и обосновать непревышение уставок эксплуатационных пределов.

Цель работы — определить аналитическую зависимость (формулу) относительного количественного изменения расхода теплоносителя через ТВС от перепада давления в активной зоне на основе полученных первичных эмпирических данных гидравлических испытаний на макете ТВС.

Материалы и методы. Разработали методологию измерения расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки. На основе гидравлических испытаний на макете ТВС определили формулу расчета расхода теплоносителя через ТВС в активной зоне в зависимости от перепада давления в ней.

Результаты. Разработана методология определения расхода теплоносителя через ТВС реактора ИВВ-2М. Проведены измерения на макете ТВС — получена эмпирическая зависимость изменения расхода от перепада давления в активной зоне.

Заключение. Рассмотренная методология повышает безопасность в процессе эксплуатации реактора, так как позволяет прогнозировать температуру на выходе из ТВС, а значит, и на оболочке твэлов. Полученные зависимости (аналитическая формула) позволят рассчитывать расход теплоносителя через ТВС в активной зоне реактора, а в дальнейшем проводить анализ результатов измерений при различных компоновках активной зоны и температурах теплоносителя. Описание конструкции расходомера, анализ измерений расхода за несколько лет будут представлены в следующей публикации «Исследование изменения расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки активной зоны реактора ИВВ-2М. Часть 2».

Ключевые слова: гетерогенный исследовательский ядерный реактор водо-водяного бассейнового типа (ИВВ-2М), тепловыделяющая сборка (ТВС), компоновка активной зоны, расходомер, эксплуатационный предел, безопасность эксплуатации, расход теплоносителя, герметичность оболочек твэл, поверхностное кипение, энерговыделение

Для цитирования: Русских И.М., Селезнев Е.Н., Зырянова А.А., Волчихина Ю.В., Аристов Н.М., Калашников Н.С., Горячих А.В., Кравцова О.А., Ташлыков О.Л. Исследование изменения расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки активной зоны реактора ИВВ-2М. Часть 1. — Атомная энергия, 2025, т. 138, вып. 3, с. 113–117.

Финансирование. Исследование проводили без внешнего финансирования.

Потенциальный конфликт интересов. Все авторы заявляют об отсутствии конфликта финансовых, а также нефинансовых интересов, которые имеют отношение к содержанию данной статьи и требуют раскрытия.

ВВЕДЕНИЕ

Герметичность оболочек тепловыделяющих элементов (твэлов) — важнейший критерий безопасной эксплуатации исследовательской ядерной установки (ИЯУ)². При работе ИЯУ бассейнового типа с пластинчатым топливом во избежание повреждения твэлов необходимо исключить поверхностное кипение теплоносителя на оболочке (под слоем отложений), приводящее к росту отложений на поверхности и, соответственно, к перегреву твэлов и потере их герметичности.

Чтобы избежать повреждения твэлов, необходимо соблюдать баланс между энерговыделением в топливе и теплоотводом. Эффективность теплоотвода зависит от расхода, скорости и теплофизических параметров теплоносителя, от термического сопротивления оболочки твэла, а также от наличия, сплошности, толщины и состава оксидной пленки и отложений.

Оксидная пленка и особенно отложения примесей теплоносителя обладают небольшим коэффициентом теплопроводности, поэтому даже незначительное

¹Соискатель степени канд. техн. наук.

²НП-009–17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила ядерной безопасности исследовательских реакторов» (с изменениями на 28 декабря 2021 года): <https://docs.cntd.ru/document/436762418?marker=6540IN>

увеличение толщины оксидных пленок и отложений может привести к существенному снижению эффективности охлаждения. Кроме того, ухудшению теплоотвода способствует снижение расхода теплоносителя через межтвэльные зазоры в тепловыделяющей сборке (ТВС) в процессе эксплуатации, а также из-за коррозии и роста отложений на оболочках твэлов и распухания топлива.

Оболочка твэлов ТВС исследовательского водо-водяного (ИВВ) ядерного реактора бассейнового типа ИВВ-2М изготовлена из алюминиевого сплава АМЧН2, на поверхности которого образуется оксидная пленка из различных модификаций гидроксида алюминия $Al(OH)_3$ и слой отложений примесей теплоносителя 1-го контура. Толщина оксидной пленки и отложений зависит от времени нахождения ТВС в активной зоне и условий эксплуатации реактора в различных режимах.

Оценить надежность режима отвода тепла и прогнозировать температуру на выходе из ТВС при их эксплуатации позволяет знание величины расхода через межтвэльные зазоры в ТВС.

В проекте реактора для ТВС ИВВ-2М обоснованы³ динамические эксплуатационные пределы, а также пределы безопасной эксплуатации, зависящие от температуры теплоносителя на входе в ТВС, которая варьируется от 25 до 45 °С (в зависимости от времени года, поскольку теплоноситель охлаждается через 2-й контур водой из Белоярского водохранилища), и от перепада давления в активной зоне — от 55 до 35 кПа. С учетом этих условий определяют рекомендуемый уровень энерговыделения в ТВС и величины предупредительных и аварийных уставок температуры на выходе из ТВС.

Таким образом, зная расчетное энерговыделение в ТВС и проводя измерения расхода теплоносителя, возможно прогнозировать температуру теплоносителя на выходе из ТВС на кампанию и обосновать не превышение уставок эксплуатационных пределов. Анализ расхода теплоносителя через ТВС, имеющие схожие условия эксплуатации, позволит получить эмпирические зависимости изменения расхода от различных параметров в процессе эксплуатации и отказаться от проведения измерений.

Цель работы — определить аналитическую зависимость (формулу) относительного количественного изменения расхода теплоносителя через ТВС от перепада давления в активной зоне на основе полученных первичных эмпирических данных гидравлических испытаний на макете ТВС.

Задачи, решаемые в первой части работы:

- определение методологии расчета расхода теплоносителя через ТВС при нахождении в активной зоне;
- проведение гидравлических испытаний на макете ТВС;

- определение формулы расчета величины расхода теплоносителя через ТВС.

Задачи, решаемые во второй части работы, будут представлены в публикации «Исследование изменения расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки активной зоны реактора ИВВ-2М. Часть 2».

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Исследовательская ядерная установка

Размещенная на промплощадке АО «Институт реакторных материалов» (г. Заречный, Свердловская обл.) ИЯУ включает водо-водяной исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М бассейнового типа с номинальной мощностью 15 МВт, инженерные сооружения, системы и оборудование [1, 2].

Активная зона реактора ИВВ-2М располагается в нижней части бассейна реактора, в которую устанавливаются шестигранные ТВС, экспериментальные и облучательные устройства, шестигранные бериллиевые, свинцовые или алюминиевые блоки отражателя.

В реакторе реализована схема движения теплоносителя через активную зону сверху вниз: вода всасывается из-под опорной плиты активной зоны и, проходя в межтрубном пространстве теплообменника, возвращается в пространство бассейна над активной зоной. Вода 2-го контура охлаждения (из Белоярского водохранилища) циркулирует по трубам теплообменника.

Тепловыделяющие сборки (рис. 1) состоят из пяти трубчатых шестигранных твэлов, коаксиально установленных между шестигранными чехловыми

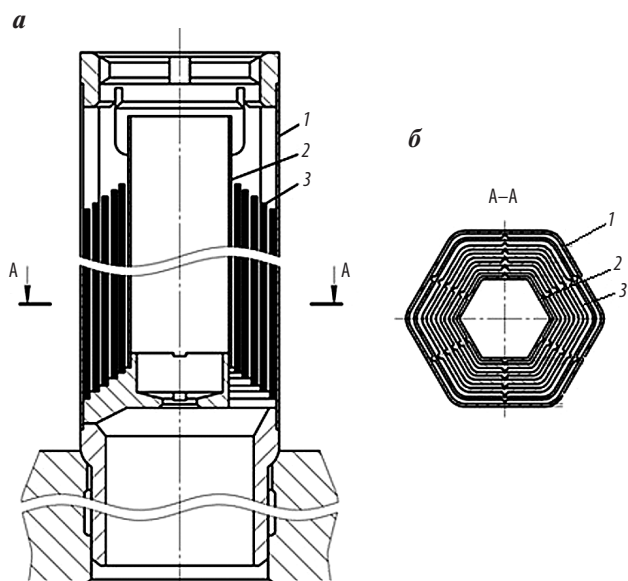


Рисунок составлен авторами

Рис. 1. Вертикальный (а) и горизонтальный (б) разрезы тепловыделяющей сборки реактора ИВВ-2М. 1 — внешняя чехловая труба; 2 — внутренняя чехловая труба; 3 — тепловыделяющие элементы

³Ф-940/00. Отчет по обоснованию безопасности комплекса с исследовательским ядерным реактором ИВВ-2М. АО «НИКИЭТ», 2014.

трубами. Оболочки топливных элементов и чехловые трубы изготовлены из сплава алюминия. Топливный слой — двуокись урана, диспергированная в алюминиевой матрице [3–5].

МЕТОДОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЧЕРЕЗ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ

Измерения расхода теплоносителя через ТВС проводят на остановленном реакторе (в «холодном» состоянии) при включенном циркуляционном насосе. В процессе измерений регистрируют расход теплоносителя через ТВС, а также параметры теплоносителя во время измерений: температуру теплоносителя на входе и выходе из ТВС, на входе в теплообменник и перепад давления в активной зоне.

При повышении мощности реактора, в результате повышения температуры теплоносителя, изменяются физические свойства воды и величина перепада давления в активной зоне. Прогнозное значение температуры на входе в ТВС определяется в соответствии с температурой воды на входе в теплообменник, перепадом давления в активной зоне и коэффициентом теплоотдачи теплообменника. Рабочая плотность теплоносителя, кинематическая вязкость и теплоемкость теплоносителя определяются в соответствии с прогнозной температурой на входе в ТВС.

Расход теплоносителя через ТВС на номинальном уровне определяется в соответствии с результатами пролива, проведенного в АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежале» (НИКИЭТ) в 2008 г., а также согласно полученной аналитической зависимости. На макете ТВС исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М проведены гидравлические испытания⁴, для того чтобы определить следующие показатели:

- расход теплоносителя в пространстве межтвэльных щелей, а также в центральной полости;
- общую гидравлическую характеристику межтвэльной проточной части макета.

Для решения первой задачи исследовали межтвэльную проточную часть макета ТВС при перекрытии центральной полости. Провели индивидуальную гидравлическую тарировку межтвэльных щелей с целью получить их гидравлические характеристики. В табл. 1 представлены полученные в ходе работы значения расходов теплоносителя в межтвэльных щелях при перепаде давления 49 кПа и температуре теплоносителя 53 °С, а также аналитические зависимости $\Delta P = f(G)$ для щелей.

В ходе решения второй задачи определяли гидравлическую характеристику межтвэльной проточной части кассеты при параллельно работающих щелях. Получили аналитическую зависимость для данного варианта (далее использовали ее для опре-

Таблица 1. Зависимость расхода теплоносителя от перепада давления для отдельных межтвэльных щелей тепловыделяющей сборки

Номер щели от центра активной зоны	G , м ³ /ч	G , %	Зависимость $\Delta P = f(G)$, кПа
1	1,71	8,9	$\Delta P = 1,867 \cdot G^{1,83}$
2	2,97	15,5	$\Delta P = 0,681 \cdot G^{1,83}$
3	3,48	18,1	$\Delta P = 0,511 \cdot G^{1,83}$
4	3,77	19,6	$\Delta P = 0,442 \cdot G^{1,83}$
5	4,32	22,5	$\Delta P = 0,344 \cdot G^{1,83}$
6	2,96	15,4	$\Delta P = 0,688 \cdot G^{1,83}$
Сумма	19,21	100	—

Авторы составили таблицу на основе зависимостей, полученных в АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежале»

Примечание. G — расход теплоносителя; ΔP — перепад давления в активной зоне, кПа; «—» — аналитическая зависимость для всей тепловыделяющей сборки не получена. Условия эксперимента: перепад давления 49 кПа, температура теплоносителя 53 °С.

деления расхода теплоносителя на номинальном уровне мощности):

$$\Delta P = 0,0273G^{1,79}.$$

При одинаковых перепадах давления для горячей и холодной воды пересчет проводится по формуле:

$$G_{\text{раб}} = G_{\text{изм}} \left[\left(\frac{\rho_{\text{изм}}}{\rho_{\text{раб}}} \right) \cdot \left(\frac{\nu_{\text{изм}}}{\nu_{\text{раб}}} \right)^{0,21} \right]^{\frac{1}{1,79}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{раб}}$ — расход воды при номинальном уровне мощности, м³/ч; $G_{\text{изм}}$ — расход теплоносителя (воды) при проведении измерений, м³/ч; $\rho_{\text{раб}}$ и $\nu_{\text{раб}}$ — плотность и коэффициент кинематической вязкости для воды при номинальном уровне мощности, кг/м³ и м²/с соответственно; $\rho_{\text{изм}}$ и $\nu_{\text{изм}}$ — плотность и коэффициент кинематической вязкости для воды при проведении измерений, кг/м³ и м²/с соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовательский реактор периодически останавливают для перегрузки топлива и выгрузки экспериментальных устройств, в среднем 1 раз в 3 нед. Таким образом, компоновка его практически всегда различается, поэтому перепад давления, создаваемый элементами активной зоны, не одинаков. К тому же теплоноситель, охлаждаемый через 2-й контур водой из Белоярского водохранилища, в зависимости от времени года имеет различную температуру. Формула (1) позволяет привести к одинаковым условиям измерения в разное время года и на разных компоновках

⁴150-097-7553. Отчет «Анализ существующих гидравлических характеристик ТВС ИВВ-2М и актуализация существующих расчетных моделей». АО «НИКИЭТ», 2008.

величины расхода теплоносителя через ТВС и проанализировать их.

Для прогнозирования уставок эксплуатационных пределов температуру теплоносителя на выходе из ТВС определили по формуле расчета тепловой мощности ТВС:

$$N = \frac{1,025G\Delta t c_{\text{H}_2\text{O}}}{3600}, \quad (2)$$

где N — мощность ТВС, кВт; 1,025 — коэффициент, учитывающий рассеивание тепла; G — расход теплоносителя через ТВС, м³/ч; $\Delta t = (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})$ — разница температур теплоносителя на входе и выходе ТВС, °C; $c_{\text{H}_2\text{O}}$ — теплоемкость воды, кДж/(кг·°C); ρ — плотность воды, кг/м³.

При комнатной температуре формула (2) принимает вид:

$$N = 1,16G\Delta t. \quad (3)$$

Зная прогнозные значения $\Delta P_{\text{изм}}$, $\rho_{\text{изм}}$, $v_{\text{изм}}$, $\rho_{\text{раб}}$, $v_{\text{раб}}$ и $G_{\text{р. ТВС}}$, рассчитанные в соответствии с (1), по формуле (3) определили разницу температур Δt теплоносителя на входе и выходе ТВС, а следовательно, и температуру на выходе из ТВС. Таким образом, в соответствии с эксплуатационной документацией прогнозируются теплогидравлические параметры реактора на номинальном уровне мощности, а именно температура на выходе из ТВС. В случае прогнозирования превышения уставок проводят дополнительные перегрузки в активной зоне реактора, после чего — уточняющие измерения расхода через ТВС.

За период с 2016 по 2020 г. накопился массив статистических данных по ТВС с различной историей эксплуатации. Проанализировав их, можно определить зависимость изменения расхода теплоносителя через ТВС от временного ресурса эксплуатации и в зависимости от выгорания. Результаты анализа полученных зависимостей будут представлены в следующей публикации «Исследование изменения расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки активной зоны реактора ИВВ-2М. Часть 2».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы поэтапно выполнена поставленная цель:

- разработана методология определения расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М;
- проведены гидравлические испытания на макете тепловыделяющей сборки, проведены измерения;
- получена эмпирическая зависимость изменения расхода от перепада давления в активной зоне.

Рассмотренная методология повышает безопасность в процессе эксплуатации реактора, так как позволяет прогнозировать температуру на выходе из тепловыделяющей сборки, а значит, и на оболочке ТВЭЛов.

Конструкция расходомера, разработанного в АО «НИКИЭТ», и полученные за 2016–2020 гг. относительные изменения расхода теплоносителя через тепловыделяющую сборку в зависимости от ее выгорания и времени нахождения в активной зоне будут представлены в статье «Исследование измерения расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки активной зоны реактора ИВВ-2М. Часть 2».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Thuong T.V., Tashlykov O.L., Glukhov S.M. et al.** Experimental and theoretical justification of passive heat removal system for irradiated fuel assemblies of the nuclear research reactor in a spent fuel pool. — NET, 2023, v. 55, iss. 6, 2088–2095. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.02.028>
2. **Russkikh I.M., Seleznev E.N., Zyryanova A.A. et al.** Conducting in-reactor studies of objects the length of which exceeds the height of the IVV-2M reactor core. — NET, 2024, v. 10, No. 3, p. 161–168. <https://doi.org/10.3897/nucet.10.128016>
3. **Лушникова М.В., Дьяков А.А.** Дезактивация первого контура реактора ИВВ-2М. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2019, вып. 5 (101), с. 46–63. <https://www.elibrary.ru/renndh>
4. **Дьяков А.А., Марков Д.В.** О диспергировании гидроксида алюминия осколками деления урана как возможной причине повышения скорости поступления алюминия в первый контур исследовательского ядерного реактора. — Радиохимия, 2019, т. 61, № 2, с. 148–151. <https://www.elibrary.ru/zcefjnj>
5. **Дьяков А.А., Марков Д.В.** Радиационное состояние первого контура реактора ИВВ-2М при нарушениях нормальной эксплуатации. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2018, вып. 5 (96), с. 71–79. <https://www.elibrary.ru/zsrfpv>

Вклад авторов

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: Русских И.М. — концепция работы, утверждение окончательной версии рукописи для публикации; Русских И.М., Ташлыков О.Л., Зырянова А.А. — работа с источниками литературы, написание и редактирование статьи; Русских И.М., Ташлыков О.Л., Селезнев Е.Н. — разработка дизайна исследования, дизайн методологии; Волчихина Ю.В., Аристов Н.М. — статистическая обработка данных, составление рисунков; Калашников Н.С., Кравцова О.А., Горячих А.В. — проведение экспериментальных работ, анализ и интерпретация данных.

Идентификаторы авторов

Русских Иван Михайлович: SPIN-код 7438-5084; AuthorID 892826

Селезнев Евгений Николаевич: SPIN-код 3552-3478; AuthorID 1287764

Зырянова Александра Анатольевна: SPIN-код 4841-5165; AuthorID 1287702

Волчихина Юлия Васильевна: SPIN-код 3665-5914; AuthorID 1121344

Аристов Николай Максимович: SPIN-код 7792-5812; AuthorID 1287705

Калашников Николай Сергеевич: SPIN-код 9053-8608; AuthorID 1288913

Горячих Андрей Владимирович: SPIN-код 2462-8363; AuthorID 1288225

Кравцова Ольга Анатольевна: SPIN-код 5740-8849; AuthorID 1289133

Ташлыков Олег Леонидович: SPIN-код 8526-2890; AuthorID 573225