

УДК 621.039.54
PACS 28.41.Fr

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПУЧКЕ ТВЭЛОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА РИТМ-200С МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГБЛОКА

Дмитриев С.М., Демкина Т.Д.¹, Добров А.А.², Доронков Д.В., Пронин А.Н.², Рязанов А.В.²

(ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород)

Контакты: Денис Владимирович Доронков; nevid000@mail.ru

Модернизированный плавучий энергоблок с реактором РИТМ-200С разработан для обеспечения электроэнергией районов с децентрализованным энергоснабжением. Новая конструкция кассетной активной зоны с повышенными показателями энергоресурса, надежности и безопасности требует завершающего комплексного обоснования.

Цель работы – экспериментальное исследование гидродинамики теплоносителя в пучке твэлов ТВС для дальнейшего обоснования характеристик новой кассетной активной зоны реактора РИТМ-200С.

Материалы и методы. Разработанная по заказу государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» масштабная модель фрагмента пучка твэлов ТВС исследована на аэродинамическом стенде в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Изучение структуры потока проводили пневмометрическим методом при помощи пятиканального пневмометрического датчика.

Результаты. В регулярных ячейках за дистанционирующей решеткой зафиксировано образование поперечных потоков на расстоянии $L/d_r \approx 1$ от пластин. Выравнивание структуры аксиального потока в регулярных ячейках происходит на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от решетки, безразмерная скорость составляет 1,0–1,1. Наименьшая скорость аксиального потока наблюдается в угловых ячейках с перекрытым пластинами сечением, ее безразмерная величина на расстоянии $L/d_r \approx 1$ от пластин: 0,3–0,6. Скорость движения аксиального потока у центрального вытеснителя выше, чем на периферии, безразмерная ее величина на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от решетки: 0,75–0,9.

Обсуждение. В структуре потока выделено три зоны – в области регулярных ячеек, центрального вытеснителя и на периферии (у чехла ТВС), скорость потока в них отличается на 25–30%. Схема расположения пластин решеток (геометрия) оказывает значительное влияние на структуру потока на расстоянии, превышающем $L/d_r \approx 10$.

Заключение. Выявленные особенности течения потока следует учитывать при обосновании теплотехнической надежности новых кассетных активных зон с использованием теплогидравлического кода «КАНАЛ». Необходимо изменить методику расчета в коде – увеличить число типов расчетных ячеек, учитывать неоднородности расхода потока по областям пучка твэлов и типам ячеек.

Ключевые слова: модернизированный плавучий энергоблок, реакторная установка, кассетная активная зона, тепловыделяющая сборка, пучок твэлов, теплоноситель, поток, дистанционирующая решетка, гидродинамические характеристики, аксиальная скорость, тангенциальная скорость

Для цитирования: Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В. Особенности течения теплоносителя в пучке твэлов тепловыделяющей сборки реактора РИТМ-200С модернизированного плавучего энергоблока. – Атомная энергия, 2024, т. 137, вып. 3–4, с. 147–151.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (№ FSWE-2024-0003).

Потенциальный конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

На текущий момент идет завершающий этап разработки государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» модернизированного плавучего энергоблока, предназначенного для обеспечения электроэнергией удаленных территорий, а также районов с децентрализованным энергоснабжением [1–2]. Для этого энергоблока специалистами АО «ОКБМ Африкантов» разработан реактор РИТМ-200С.

Один из основных узлов реактора РИТМ-200С – активная зона, к которой предъявляют повышенные требования по ресурсу, энергоресурсу, надежности и безопасности. В новой активной зоне реактора применены тепловыделяющие сборки (ТВС) с увеличенной высотой активной части – до 1650 мм, для повышения продолжительности кампании, а также тепловыделяющие элементы (твэлы) с увеличенной

толщиной оболочки из коррозионностойкого сплава [3–4]. Новые технические решения требуют проведения всестороннего экспериментального и расчетного обоснования конструкции активной зоны. Один из его этапов – экспериментальное исследование гидродинамики теплоносителя в пучке твэлов отдельной ТВС. Полученные достоверные знания позволяют повысить точность результатов теплогидравлического расчета активных зон при обосновании их надежности.

Цель настоящей работы, таким образом, состояла в экспериментальном исследовании гидродинамических характеристик потока, движущегося в пучке твэлов ТВС, для дальнейшего обоснования теплотехнической надежности новой кассетной активной зоны.

¹Аспирант очного отделения.²Соискатель кандидатской степени.

В настоящее время в открытой печати представлено немало результатов научных работ, посвященных модернизации активных зон реакторов малой мощности, например [5–7].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Течение водяного теплоносителя в активной части пучка твэлов ТВС моделировалось воздушной рабочей средой исследовательского стенда с использованием теории гидродинамического подобия [8]. Исследовательская установка представляет собой разомкнутый аэродинамический контур, в который входят система нагнетания воздушного потока и экспериментальная модель фрагмента пучка твэлов ТВС с системой измерения.

Модель (рис. 1) выполнена в виде прозрачного канала шестигранной формы, корпус которого имитирует чехол штатной ТВС. Смоделированный пучок стержней повторяет геометрию пучка твэлов штатной ТВС и состоит из имитаторов твэлов и стержней выгорающего поглотителя. В пучке стержней модели последовательно установлены три имитатора дистанционирующих решеток, которые имеют сложную конструкцию и состоят из отдельных пластин разной толщины и профиля, закрепленных между внешней и внутренней обечайками. Имитатор центрального вытеснителя с обтекателем крепится во внутренних обечайках решеток. Шаг постановки имитаторов решеток в модели соответствует их штатному расположению, увеличенному согласно масштабному коэффициенту. Имитаторы дистанционирующих решеток соединены шестью уголками жесткости, закрепленными в углах внешней обечайки решеток и повторяющими геометрию элемента конструкции штатной ТВС. Все элементы модели увеличены относительно натурного объекта примерно в 6 раз, что продиктовано необходимостью обеспечения высокого значения критерия Рейнольдса и минимизацией влияния средств измерения на структуру потока воздушной среды исследовательского стенда.

Гидродинамические характеристики потока, движущегося в пучке твэлов ТВС, изучали пневмометрическим методом. Аксиальную скорость потока измеряли с помощью пневмометрических трубок Пито разной конструкции и цифрового дифференциаль-

ного манометра, а тангенциальные скорости — пятиканальным пневмометрическим датчиком (погрешность не превышает 7%).

Датчик изначально тарировали в воздушном потоке с заранее известными параметрами — аксиальной скоростью, полным и статическим давлением в точке позиционирования. Значения давлений, измеренные в модели, в соответствии с тарировочными зависимостями пересчитали в величины компонент скорости (v_x, v_y, v_z).

Большое количество ячеек различной формы и геометрия пластин решетки, по-разному пересекающихся в них, обусловили размер области проведения измерений, занимающей 1/3 часть поперечного сечения пучка твэлов в модели, — область выделена красной линией (см. рис. 1, б). Скорость потока определяли по всей области измерения, согласно равномерному полю расположения точек проведения замеров. По длине пучка стержней замеры проводили в десяти сечениях за имитатором дистанционирующей решетки, шаг расположения которых по мере удаления от решетки увеличивается (см. рис. 1, а).

Оценку общей структуры потока и определение области распространения его неоднородности по длине пучка твэлов, обусловленной сложной геометрией решеток, проводили на основе картограмм безразмерной аксиальной и тангенциальной скорости. Значения безразмерных скоростей в точке получали нормированием на скорость потока воздуха (36,2 м/с) на входе в модель. Соответствующее данной скорости значение критерия Рейнольдса — 88 000.

Структуру потока и область распространения его неоднородности по длине пучка твэлов за решетками определяли в зоне автомодельности (самоподобия), что делает возможным использование опытных данных для исследования течения водяного теплоносителя. Начало зоны автомодельного движения воздушного потока в модели отмечено при величине критерия Рейнольдса 35 000. Подробнее обоснование представительности исследований приведено в [9].

Дополнительно представительность экспериментов подтверждается соответствием коэффициентов гидравлического сопротивления имитаторов дистанционирующих решеток штатным элементам конструкции при идентичных величинах критерия

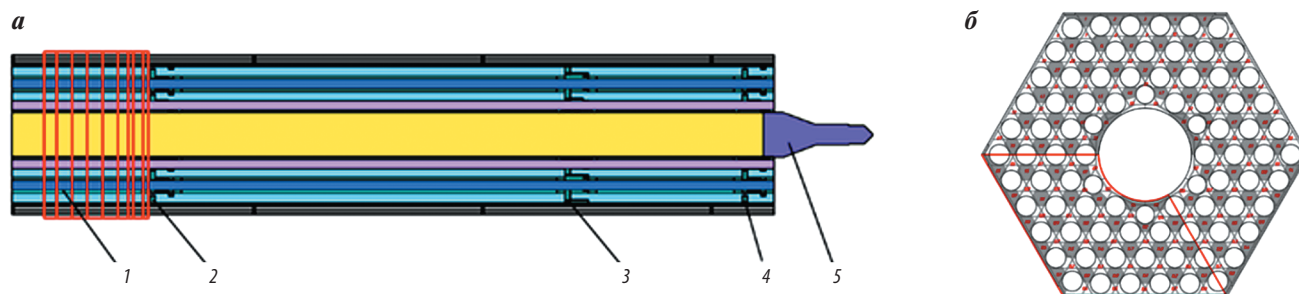


Рисунок составлен авторами на основе собственных данных и взят из [8]

Рис. 1. Экспериментальная масштабная модель фрагмента пучка твэлов: а — продольное сечение; б — поперечное сечение. 1 — область проведения измерения аксиальной скорости потока по длине модели; 2–4 — имитаторы дистанционирующих решеток; 5 — имитатор трубы центрального вытеснителя с обтекателем

Рейнольдса. Величина коэффициента гидравлического сопротивления имитатора штатной дистанционирующей решетки составила 0,29.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В поле регулярных ячеек за решеткой зафиксировано образование поперечных потоков внутри обечаек решетки на расстоянии менее $L/d_r \approx 1$ от пластин, где L — продольная координата сечения измерений от пластин имитатора дистанционирующей решетки; d_r — гидравлический диаметр пучка стержней модели³. Величина безразмерной тангенциальной скорости в области данных течений достаточно неоднородна и составляет 0,08–0,22. Поперечные потоки преимущественно сконцентрированы за пластинами и ребрами жесткости решетки в местах их контакта с твэлами, при этом за ребрами жесткости безразмерные тангенциальные скорости максимальны (0,17–0,22), а за пластинами их величина в 2 раза меньше, что обусловлено меньшей толщиной и шириной пластин. Поперечные потоки в области регулярных ячеек, обусловленные сложной геометрией пластин решетки, сохраняют свою структуру вплоть до расстояния $L/d_r \approx 3,1$ от пластин, далее отмечены только низкоинтенсивные поперечные течения теплоносителя между соседними регулярными ячейками (рис. 2).

У чехла ТВС, возле его граней и около уголков жесткости, где пластины отсутствуют, поперечные потоки ориентированы из регулярных ячеек на периферию (к чехлу ТВС), величина безразмерной тангенциальной скорости в них составила 0,08–0,13. В свою очередь, у граней чехла ТВС, где пластины пересекаются в ячейках, поперечные потоки имеют обратную направленность, а безразмерная танген-

циальная скорость в них составила 0,11–0,14. Данные процессы начинаются на расстоянии менее $L/d_r \approx 1$ от пластин решетки и заканчиваются на расстоянии $L/d_r \approx 7,5$ и $L/d_r \approx 5$ для случаев с отсутствием пластин и их пересечением в ячейках соответственно (см. рис. 2).

Возле центрального вытеснителя на расстоянии $L/d_r \approx 1,7$ от пластин решетки поперечные потоки направлены вдоль его поверхности по кругу, а также от него в направлении поля регулярных ячеек. Данные поперечные потоки зафиксированы на протяжении всей области проведения замеров. Величина безразмерной тангенциальной скорости в поперечном потоке, движущемся вокруг вытеснителя — 0,13–0,16 (и не изменяется на протяжении всей области измерений); в поперечном потоке, направленном в поле регулярных ячеек — 0,11–0,13, на расстоянии $L/d_r \approx 1,7$ от пластин.

Аксиальный поток приобретает значительную неоднородность, обусловленную сложной геометрией пучка твэлов и конструкцией дистанционирующей решетки, а также наличием центрального вытеснителя, уголков жесткости и чехла ТВС (рис. 3).

В регулярных ячейках, без пластин решетки в центре, структура аксиальной скорости потока однородна, величина безразмерной скорости равна 1,1–1,2, на расстоянии менее $L/d_r \approx 1$ от пластин; 0,9–1,1 — на расстоянии $L/d_r \approx 10$. В регулярных ячейках с пересечением пластин решетки в центре аксиальный поток неоднороден, безразмерная скорость — 0,5–0,9. За профилями пластин решетки, в зазорах между твэлами, и в местах контакта твэлов с пластинами зафиксированы минимальные значения аксиальной скорости потока, а наибольшие — в областях ячеек, свободных от пластин решетки. Безразмерная скорость в ее локальных минимумах и максимумах составила 0,5–0,7 и 0,8–0,9 соответственно.

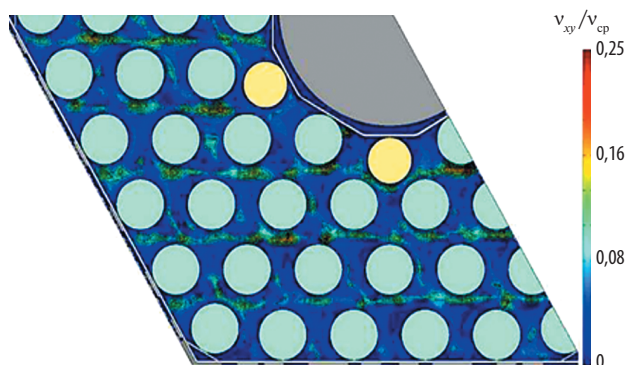


Рисунок составлен авторами на основе собственных данных

Рис. 2. 2D-картограмма безразмерной тангенциальной скорости поперечных потоков в области регулярных ячеек на расстоянии $L/d_r \approx 3,1$ от пластин, где L — продольная координата сечения измерений от пластин имитатора дистанционирующей решетки; d_r — гидравлический диаметр пучка стержней модели; v_{xy}/v_{cp} — безразмерная тангенциальная скорость потока, где v_{xy} — тангенциальная скорость потока, x — ось абсцисс, y — ось ординат, v_{cp} — скорость потока воздуха на входе в модель

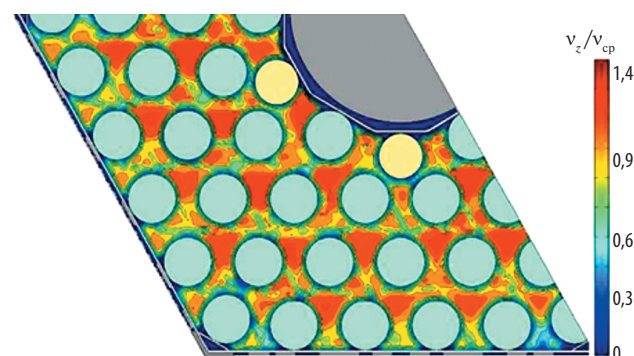


Рисунок составлен авторами на основе собственных данных

Рис. 3. 2D-картограмма безразмерной аксиальной скорости поперечного потока в поле регулярных ячеек на расстоянии $L/d_r \approx 1$ от пластин решетки; v_z/v_{cp} — безразмерная аксиальная скорость потока, где v_z — аксиальная скорость потока, z — ось аппликата

³РБ-040-09. Руководство по безопасности расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования водоохлаждаемых ядерных энергетических установок: <https://docs.cntd.ru/document/1200079316>

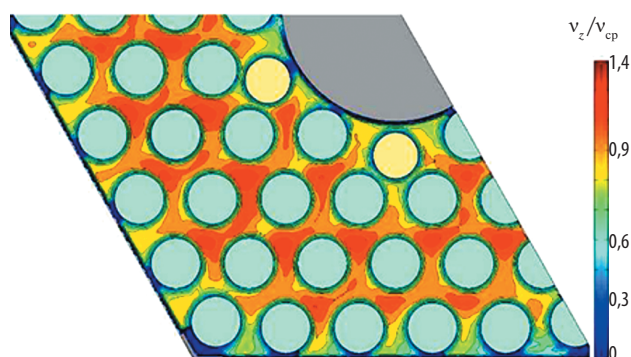


Рисунок составлен авторами на основе собственных данных

Рис. 4. 2D-картограмма безразмерной аксиальной скорости потока в регулярных ячейках на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от пластин решетки. См. экспликацию под рис. 2, 3

Выравнивание структуры аксиального потока в регулярных ячейках происходит на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от пластин решетки, безразмерная скорость потока на данном расстоянии – 1,0–1,1 (рис. 4).

В области одного ряда твэлов у поверхности чехла ТВС (на периферии) скорость движения аксиального потока ниже, чем в регулярных ячейках, величина безразмерной скорости потока на расстоянии менее $L/d_r \approx 1$ от пластин решетки составила 0,3–0,9, а на расстоянии $L/d_r \approx 10$ – 0,5–1,0 (см. рис. 3). Столь значительный диапазон скорости обусловлен частичным торможением аксиального потока у чехла ТВС, наличием двух типов перекрытия проходного сечения периферийных ячеек пластинами решетки, а также расположением в данной области уголков жесткости и дополнительных угловых ребер жесткости дистанционирующей решетки. Данные факторы обусловили меньшую площадь проходного сечения угловых ячеек, а также уменьшенные размеры зазоров между твэлами в этом типе ячеек.

В периферийных ячейках, расположенных у грани чехла ТВС вне уголков жесткости, на скорость аксиального течения потока значительное влияние оказывает схема расположения пластин решетки. На расстоянии $L/d_r \approx 1$ от решетки безразмерная скорость в ячейках без пластин в центре и с их наличием составила 0,8–0,9 и 0,4–0,75 соответственно, а на расстоянии $L/d_r \approx 10$ – 0,9–1,0 и 0,5–0,8 соответственно (см. рис. 3).

Наименьшая скорость движения аксиального потока в данной области зафиксирована в угловых ячейках, проходное сечение которых перекрыто пластинами, безразмерная скорость в них на расстоянии $L/d_r \approx 1$ от пластин составила 0,3–0,6, а на расстоянии $L/d_r \approx 10$ – 0,4–0,7. В угловых ячейках без пластин решетки безразмерные аксиальные скорости потока выше и на расстояниях $L/d_r \approx 1$ и $L/d_r \approx 10$ составили 0,6–0,8 и 0,8–0,9 соответственно.

Возле центрального вытеснителя скорость движения аксиального потока выше, чем на периферии, у чехла ТВС, а ее безразмерная величина на расстояниях $L/d_r \approx 1$ и $L/d_r \approx 10$ от пластин решетки составила 0,8–1,1 и 0,75–0,9 соответственно (см. рис. 3). На структуру аксиального потока в области централь-

ного вытеснителя схема расположения пластин решетки не оказывает значительного влияния (подтверждается небольшими диапазонами безразмерной скорости); определяющее влияние оказывают поперечные течения, направленные из области вытеснителя в регулярные ячейки, что обусловило снижение аксиальной скорости на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от решетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пучке твэлов ТВС аксиальный поток имеет значительную неоднородность, обусловленную сложной геометрией пучка твэлов и дистанционирующих решеток, наличием чехла ТВС, центрального вытеснителя и уголков жесткости.

У чехла ТВС аксиальное течение потока обладает наименьшей скоростью, локальные минимумы аксиальной скорости отмечены в области уголков жесткости, с пересечением пластин решетки, безразмерная скорость в среднем по области измерения составила 0,3–0,7. Процесс выравнивания аксиальной скорости потока между угловой областью и регулярными ячейками имеет малую интенсивность, однако на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от пластин решетки зафиксировано некоторое увеличение аксиальной скорости возле уголков жесткости.

За пластинами решетки аксиальный поток в области регулярных ячеек неоднороден, локальные минимумы скорости расположены за пластинами, в местах их контакта с твэлами, а также в зазорах между твэлами. Выравнивание структуры аксиального потока в регулярных ячейках происходит на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от пластин решетки, безразмерная скорость составила 1,0–1,1.

У центрального вытеснителя отмечено снижение аксиальной скорости потока, ее безразмерная величина на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от пластин уменьшилась до 0,75–0,9. Это обусловлено наличием поперечных течений, направленных в область регулярных ячеек.

Следовательно, в структуре аксиального потока можно выделить три основные зоны, проявляющиеся в области регулярных ячеек, центрального вытеснителя и в периферийной (у чехла ТВС). Аксиальная скорость потока в данных локациях отличается в среднем на 25–30%. Схема расположения пластин решеток оказывает значительное влияние на структуру потока во всех областях пучка твэлов на расстоянии, превышающем $L/d_r \approx 10$.

Очевидно, что выявленные особенности течения аксиального потока необходимо учитывать при обосновании теплотехнической надежности модернизированной активной зоны реактора при помощи теплогидравлического расчетного кода «КАНАЛ»: изменить методику расчета в коде, увеличив число типов расчетных ячеек и учитывая неоднородность расхода потока по выявленным областям в пучке твэлов и по разным типам ячеек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев В.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н. и др. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития. — Атомная энергия, 2020, т. 129, вып. 1, с. 37–43.
EDN: GMQVLO
2. Петрунин В.В., Шешина Н.В., Фатеев С.А. и др. Научно-технические аспекты создания инновационной реакторной установки РИТМ-200Н для АСММ. — Атомная энергия, 2023, т. 134, вып. 1–2, с. 3–10.
EDN: WWOOWS
3. Романов А.И., Папотин В.Ю., Тутуркин М.Ю. Разработка активных зон для АСММ и ПЭБ. Текущее состояние и направления развития. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2023, вып. 5, с. 86–111.
EDN: VFSQPY
4. Самойлов О.Б., Романов А.И., Галицких В.Ю. и др. Анализ опыта эксплуатации активных зон атомных ледоколов первого поколения. База данных в обоснование и развитие новых атомных ледоколов и плавучих энергоблоков. — Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок, 2023, вып. 3, с. 16–24.
DOI: 10.52069/2414-5726_2023_3_33_16
5. Beliauskii S., Anikin N., Alhassan S. et al. Effect of fuel nuclide composition on the fuel lifetime of the RITM-200 reactor unit. — Ann. Nucl. Energy., 2022, v. 173, p. 109105.
DOI: 10.1016/j.anucene.2022.109105
6. Beliauskii S., Alhassan S., Danilenko V. et al. Effect of changing the outer fuel element diameter on thermophysical parameters of KLT-40S reactor unit. — Ann. Nucl. Energy., 2023, v. 190, p. 109877.
DOI: 10.1016/j.anucene.2023.109877
7. Wu Z., Xie J., Chen P., Xiao Y. et al. Performance of different absorber materials and move-in/out strategies for the control rod in small rod-controlled pressurized water reactor: A study based on KLT-40 model. — NET, 2024, v. 56, iss. 7, p. 2756–2766.
DOI: 10.1016/j.net.2024.02.037
8. Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А. и др. Гидродинамика теплоносителя на входе в ТВС реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности. — Теплоэнергетика, 2024, вып. 5, с. 5–21.
DOI: 10.56304/S0040363624050059
9. Гухман А.А. Введение в теорию подобия: учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений. М.: ЛКИ, 2018. 296 с.

Вклад авторов

Авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Все авторы участвовали в разработке концепции исследования, написании текста рукописи, формулировке выводов. Окончательный вариант рукописи прочтен и одобрен всеми авторами.

Идентификаторы авторов

Дмитриев Сергей Михайлович: SPIN-код 1136-7472; ORCID 0000-0003-0637-7004

Демкина Татьяна Дмитриевна: SPIN-код 2988-7539; ORCID 0000-0003-3748-3990

Добров Александр Алексеевич: ORCID 0000-0001-7363-8791

Доронков Денис Владимирович: SPIN-код 4581-3344; ORCID 0000-0003-0668-4215

Пронин Алексей Николаевич: SPIN-код 7646-5189; ORCID 0000-0001-7174-3643

Рязанов Антон Владимирович: ORCID 0000-0002-4951-8930