

ГИДРОДИНАМИКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПУЧКЕ ТВЭЛОВ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА РИТМ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГБЛОКА¹

© 2025 г. С. М. Дмитриев^а, Т. Д. Демкина^а, А. А. Добров^а,
Д. В. Доронков^{а, *}, А. Н. Пронин^а, А. В. Рязанов^а

^аНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, д. 24, г. Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: nevid000@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2024 г.

После доработки 05.11.2024 г.

Принята к публикации 04.12.2024 г.

Приведены результаты экспериментального изучения особенностей течения теплоносителя в твэльном пучке тепловыделяющей сборки (ТВС) реактора РИТМ модернизированного плавучего энергоблока. Целью работы являлось экспериментальное определение гидродинамических характеристик потока в пучке твэлов ТВС. Эксперименты проводили на исследовательском стенде с воздушной рабочей средой на модели фрагмента пучка твэлов ТВС, основываясь на теории гидродинамического моделирования. Экспериментальная модель включала в себя пучок твэлов-имитаторов, имитаторы стержней выгорающего поглотителя, а также макеты дистанционирующих решеток, центрального вытеснителя и уголков жесткости. В исследованиях применялись инвазивные методы, к числу которых относятся пневмометрический метод и метод инъекции контрастной примеси. Особенности течения потока были визуализированы с помощью картограмм аксиальной и тангенциальной скорости, а также распределения концентрации примеси. В ходе экспериментов были выявлены особенности течения аксиального потока и определена структура поперечных течений теплоносителя. В структуре потока выделено три зоны: в области регулярных ячеек, центрального вытеснителя и на периферии (у чехла ТВС). Скорость потока в них различается на 25–30%. Схема расположения пластин решеток оказывает значительное влияние на структуру потока на расстоянии, превышающем $L/d_r \approx 10.0$. Выявленные особенности течения потока следует учитывать при обосновании теплотехнической надежности новых кассетных активных зон с использованием ячейковых теплогидравлических кодов. Необходимо изменить методику теплогидравлического расчета в ячейковых теплогидравлических кодах: увеличить число типов расчетных ячеек, учитывать неоднородности расхода потока по областям пучка твэлов и типам ячеек.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, пучок твэлов, дистанционирующая решетка, чехол, центральный вытеснитель, гидродинамика теплоносителя, аксиальная скорость, тангенциальная скорость, контрастная примесь, поток

DOI: 10.56304/S0040363625700882

Создание специалистами Госкорпорации “Росатом” модернизированного плавучего энергоблока, предназначенного для обеспечения электроэнергией удаленных территорий, а также районов с децентрализованным энергоснабжением, находится на завершающем этапе. Для модернизированного плавучего энергоблока в ОКБМ им. И.И. Африкантова разработан реактор РИТМ-200С [1–3]. Одним из основных компонентов ядерного реактора является активная зона, к которой предъявляются повышен-

ные требования по ресурсу, энергоресурсу, надежности и безопасности. В новой активной зоне применены ТВС с увеличенной до 1650 мм высотой активной части для обеспечения более продолжительной топливной кампании, а также твэлы с большей толщиной оболочки из коррозионно-стойкого сплава 42ХНМ [4–6]. Для реализации новых технических решений требуется проведение экспериментального и расчетного подтверждения надежности и безопасности работы активной зоны новой конструкции. Одним из этапов обоснования новой конструкции активной зоны является экспериментальное исследование течения тепло-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0003).

носителя в пучке твэлов ТВС. Благодаря новым знаниям о гидродинамике теплоносителя повысится точность результатов теплогидравлического расчета активных зон при подтверждении их надежности [7]. Таким образом, цель работы — экспериментальное определение гидродинамических характеристик потока в пучке твэлов.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Течение водного теплоносителя моделировалось воздушной рабочей средой с использованием теории гидродинамического подобия [8–11]. Аэродинамический открытый контур стенда состоит из системы нагнетания воздушного потока и экспериментальной модели с системой измерения.

Модель выполнена в виде прозрачного шестигранного канала, корпус которого имитирует чехол штатной ТВС. Пучок стержней в ней повторяет форму фрагмента пучка твэлов штатной ТВС и состоит из имитаторов твэлов и стержней выгорающего поглотителя. В пучке стержней последовательно установлены три имитатора дистанционирующих решеток, имеющих сложную конструкцию и состоящих из пластин разной толщины и профиля. Имитатор центрального вытеснителя размещен во внутренних обечайках решеток. Шаг установки решеток в модели соответствует штатному, увеличенному согласно масштабному коэффициенту. Шесть уголков жесткости, соединяющих имитаторы решеток, закреплены на их внешних обечайках аналогично геометрической конфигурации элемента конструкции штатной ТВС (рис. 1). Все элементы модели увеличены относительно натурного объекта в 5.79 раза, что продиктовано необходимостью обеспечения высокого значения критерия Рейнольдса и минимизации влияния средств измерения на структуру потока.

ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выбор оптимального вида модели и пересчет характеристик потока, полученных в ходе экспериментов, на натурные условия течения теплоносителя возможны при соблюдении гидродинамического подобия, включающего в себя геометрические, кинематические и динамические критерии.

Геометрическое подобие выполняется при соответствии геометрических размеров модели размерам штатного объекта с учетом масштабного коэффициента.

Процессы движения сред в геометрически подобных объектах являются динамически подобными благодаря близким значениям критерия Рейнольдса. Максимальное значение критерия Рейнольдса (Re) в модели составило 90000, в штатном объекте — 100000.

Кинематическое подобие процессов движения сред в геометрически подобных объектах достигается при пропорциональности безразмерных скоростей в соответствующих точках модели и штатного объекта. Для этого необходимо обеспечить проведение исследований в зоне автомодельного движения потока.

В штатной активной зоне движение теплоносителя происходит при неизотермических условиях. Данные же исследования проведены в изотермических условиях движения потока. При использовании результатов экспериментов в инженерной практике для анализа гидродинамики водного теплоносителя в штатной активной зоне реактора РИТМ влияние неизотермичности условий его течения несущественно и его (влияние) можно не учитывать. Это обусловлено следующими факторами:

при движении теплоносителя его подогрев по всей высоте активной зоны не превышает 30°C . Поскольку исследуемый участок ограничен третьей частью одного пролета пучка твэлов между

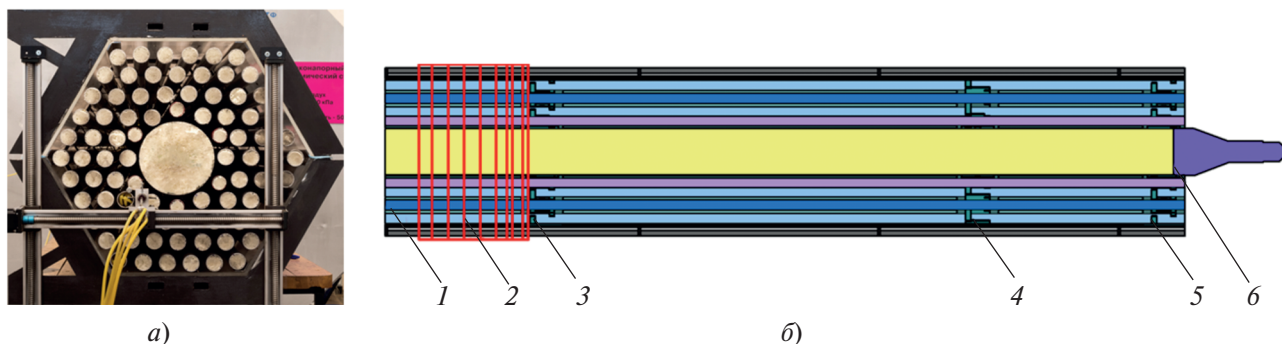


Рис. 1. Внешний вид модели фрагмента активной части пучка твэлов (а) и расположение элементов конструкции в канале модели (б).
1 — пучок стержней; 2 — область измерений; 3–5 — имитаторы дистанционирующих решеток; 6 — имитатор центрального вытеснителя с наконечником

дистанционирующими решетками, то изменение температуры потока будет незначительным;

в пучке твэлов активной зоны реактора РИТМ наблюдается турбулентное течение теплоносителя, что исключает слоистое движение потока.

Комплекс исследований гидродинамических характеристик потока в пучке твэлов был проведен при одном значении критерия Рейнольдса $Re = 90000$, что обусловлено ограниченностью параметров исследовательского стенда и общим коэффициентом гидравлического сопротивления (КГС) экспериментальной модели. Среднерасходная скорость потока на входе в модель при таком значении критерия Рейнольдса составляет 36.2 м/с. Достигнутое значение Re соответствует зоне автомодельного движения потока, что делает возможным использование опытных данных для изучения течения водного теплоносителя.

Начало зоны автомодельного движения потока определялось экспериментально на основе построения зависимостей сопротивления трения при обтекании потоком пучка гладких труб и КГС имитатора дистанционирующей решетки от критерия Рейнольдса. В результате анализа этих зависимостей было получено такое значение критерия Рейнольдса, начиная с которого сопротивление трения при обтекании потоком пучка гладких труб и КГС имитатора дистанционирующей решетки перестают существенно изменяться. Это свидетельствует о начале зоны автомодельного движения потока. При проведении экспериментов начало зоны автомодельного движения потока фиксировалось при $Re = 35000$.

Дополнительно представительность экспериментов подтверждается соответствием КГС имитаторов дистанционирующих решеток штатным элементам конструкции при идентичных значениях критерия Рейнольдса.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Гидродинамические характеристики потока в твэльном пучке изучались пневмометрическим методом и методом инъекции примеси. Компоненты скорости потока измерялись с помощью пневмометрических трубок Пито и цифрового дифференциального манометра с погрешностью, не превышающей 7.5%.

Структура поперечных потоков исследовалась методом инъекции примеси, в качестве которой использовался пропан, подававшийся с определенным расходом в ячейки впрыска, расположенные перед третьим имитатором дистанционирующей решетки по ходу движения потока, после чего отслеживалось его распространение в объеме модели. Для проведения измерений концентрации примеси в пучке стержней использовали

пробоотборный зонд, который вводили со стороны выходного сечения модели и устанавливали в определенную позицию в поперечном сечении с помощью координатного устройства.

Для обоснования изокINETичности отбора проб примеси ее концентрацию измеряли в ячейке впрыска непосредственно за имитатором дистанционирующей решетки пробоотборными зондами нескольких диаметров в одной и той же точке. Для тестовых измерений были использованы зонды, диаметры проходных сечений которых составляли 7, 5 и 3 мм. Концентрации примеси, измеренные этими зондами, находились в диапазоне 1998–2005 ppm. Полученные значения не выходят за пределы приборной погрешности газоанализатора. Следовательно, можно сделать вывод об отсутствии существенного влияния скорости движения газозооной смеси в канале измерительного зонда на показания газоанализатора. Значения концентраций примеси при инвазивном отборе проб измерительными зондами определялись с помощью газоанализатора с погрешностью, не превышавшей 1.5%.

Поддержание расхода газа осуществлялось с погрешностью не более 0.25%. Большое число ячеек различной формы для подачи примеси и геометрические характеристики пластин имитаторов дистанционирующих решеток обусловили размеры области измерений, занимавшей третью часть поперечного сечения твэльного пучка (рис. 2). Компоненты скорости потока и концентрацию примеси определяли по всей области измерения в идентичных точках согласно равномерному рас-

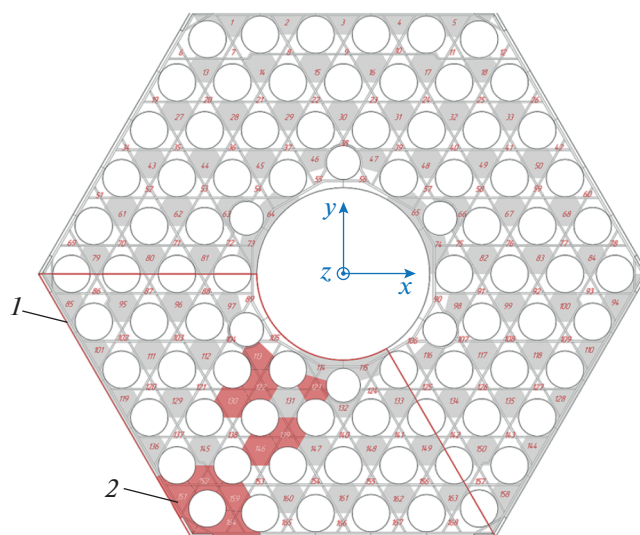


Рис. 2. Область проведения замеров и расположение ячеек впрыска примеси в поперечном сечении модели. 1 – область измерения компонент скорости потока и распределения контрастной примеси; 2 – ячейки инъекции контрастной примеси

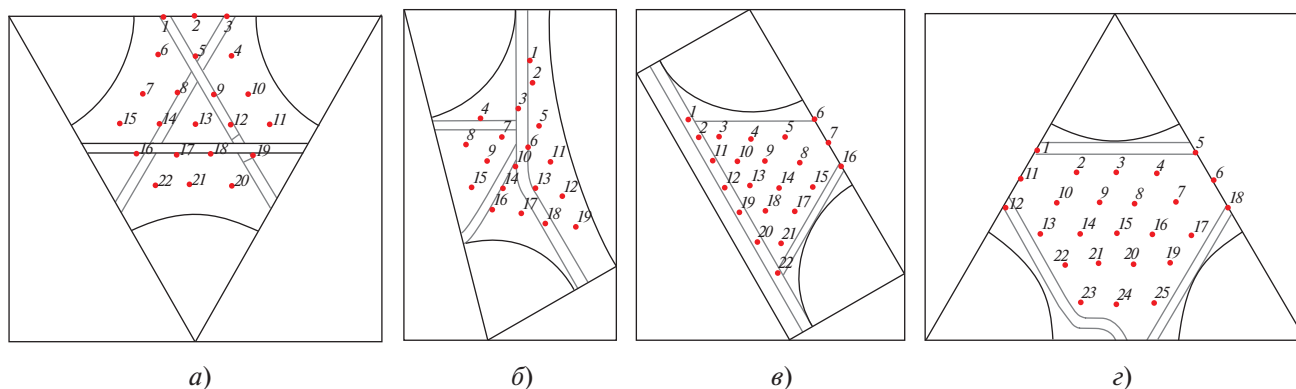


Рис. 3. Примеры расположения точек измерения в ячейках поперечного сечения модели.

Ячейка: *a* — регулярная (№ 87); *б* — возле центрального вытеснителя (№ 89); *в* — периферийная (№ 101); *г* — угловая (№ 105)

положению точек проведения замеров. Примеры расположения точек измерения в ячейках основных типов приведены на рис. 3. По длине пучка стержней замеры проводились за имитатором третьей дистанционирующей решетки в десяти сечениях, шаг расположения которых по мере удаления от решетки увеличивался (см. рис. 1). Такой выбор размеров области измерения и расположения точек подачи примеси позволил охарактеризовать общую структуру потока.

Анализ течения теплоносителя выполнялся на основе картограмм безразмерной концентрации примеси и скорости потока. Безразмерные аксиальную w_{xy}/w_{cp} и тангенциальную w_{xy}/w_{cp} скорости получали нормированием их локальных значений в каждой точке на среднерасходную скорость потока на входе в модель, безразмерную концентрацию примеси C/C_0 — нормированием ее локального значения C в каждой точке на максимальное значение концентрации примеси в ячейке впрыска перед имитатором дистанционирующей решетки C_0 .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПНЕВМОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В поле регулярных ячеек образуются поперечные потоки за пластинами и ребрами жесткости решетки в местах их контакта с твэлами на расстоянии $L/d_r \approx 1.0$ от пластин решетки (L — расстояние от пластин макета дистанционирующей решетки; d_r — гидравлический диаметр пучка стержней экспериментальной модели). За ребрами жесткости безразмерная тангенциальная скорость w_{xy}/w_{cp} составляет 0.17–0.22, за пластинами она в 2 раза ниже, что обусловлено их меньшей толщиной. Поперечные потоки сохраняют свою структуру вплоть до расстояния $L/d_r \approx 3.1$ от пла-

стин (рис. 4). При дальнейшем удалении от решетки безразмерная тангенциальная скорость потока в поле регулярных ячеек снижается и на расстоянии $L/d_r \approx 5.0$ составляет менее 0.05.

У граней чехла ТВС и уголков жесткости, где пластины решетки отсутствуют, поперечные потоки выходят из регулярных ячеек на периферию, а в местах пересечения пластин они направлены в обратную сторону. Безразмерная тангенциальная скорость поперечных потоков составила 0.08–0.13 и 0.11–0.14 соответственно. На расстояниях $L/d_r \approx 7.5$ и $L/d_r \approx 5.0$ от пластин поперечные течения прекращаются как при отсутствии пересечения, так и при пересечении пластин в ячейках соответственно (см. рис. 4).

Возле центрального вытеснителя поперечные потоки направлены вдоль его поверхности по кругу, а также в поле регулярных ячеек на расстоянии $L/d_r \approx 2.0$ от пластин. Эти поперечные потоки фиксируются на протяжении всей области проведения замеров. В поперечных потоках, движущихся вокруг центрального вытеснителя и направленных в поле регулярных ячеек, безразмерная тангенциальная скорость составила 0.13–0.16 и 0.11–0.13 соответственно. По мере движения потока вдоль пучка твэлов его тангенциальная скорость незначительно снижалась (см. рис. 4).

Аксиальный поток становился существенно неоднородным при прохождении дистанционирующей решетки, что было обусловлено сложной схемой расположения ее пластин и ребер жесткости, а также наличием центрального вытеснителя, уголков жесткости и чехла ТВС.

В регулярных ячейках структура аксиальной скорости потока была однородной при отсутствии пластин решетки в центре, а ее значение, усредненное по всей области измерения, составило 0.9–1.2. Пересечение пластин в центре регу-

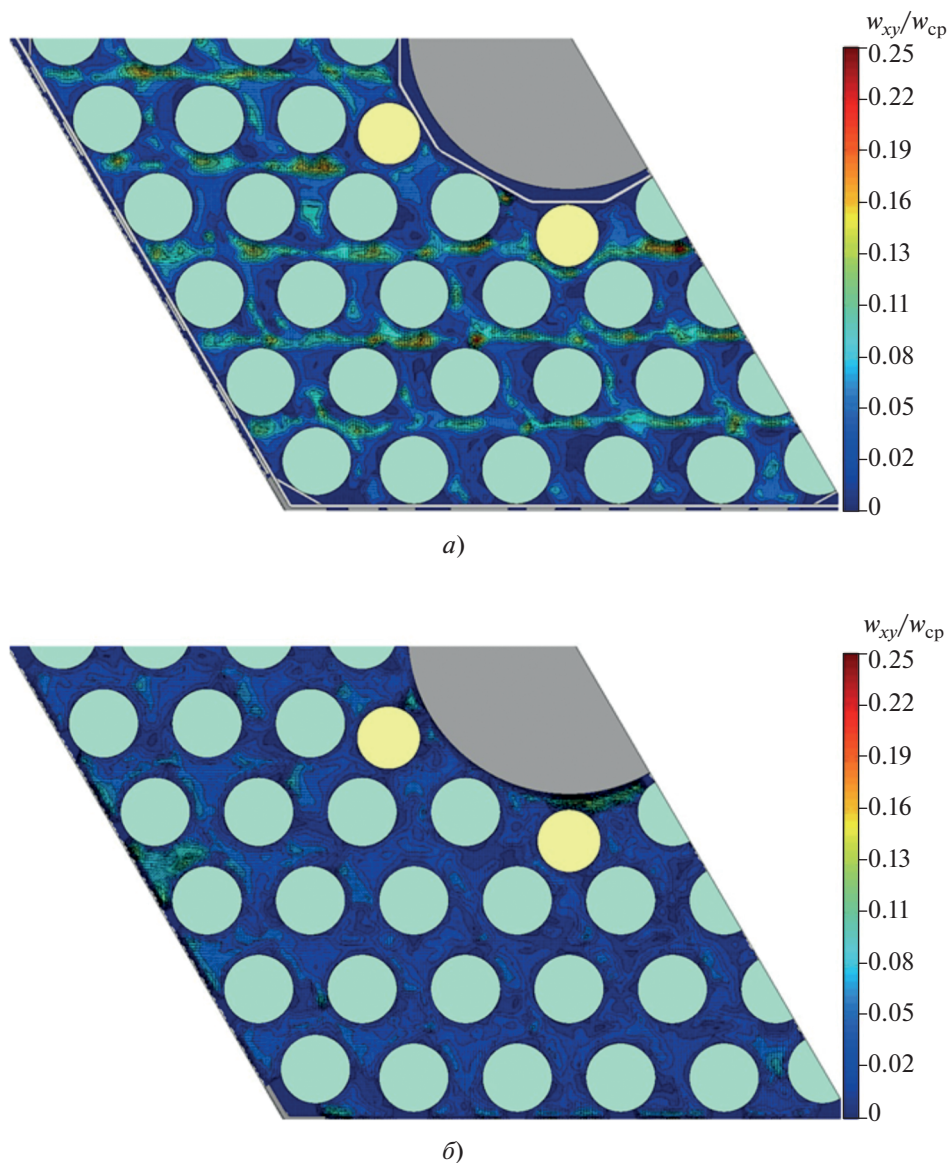


Рис. 4. Поля тангенциальной скорости потока w_{xy}/w_{cp} на расстоянии от пластин решетки $L/d_r = 1.0$ (а) и 8.0 (б)

лярных ячеек делало структуру аксиального потока неоднородной, а его скорость снижалась до 0.5.

За пластинами решетки, в местах их контакта с твэлами и в зазорах между твэлами аксиальная скорость была минимальной, наибольшие ее значения наблюдались в свободных областях ячеек, в локальных минимумах и максимумах безразмерная аксиальная скорость w_{zv}/w_{cp} составляла 0.5–0.7 и 0.8–0.9 соответственно. Гомогенизация скорости аксиального потока в поле регулярных ячеек происходила на расстоянии $L/d_r \approx 10.0$ решетки (рис. 5).

Возле чехла ТВС скорость движения потока была ниже, чем в поле регулярных ячеек. Безразмерная скорость на расстоянии $L/d_r \approx 1.0$ от пластин составила от 0.3 до 0.9. Широкий диапазон

скоростей обусловлен торможением потока у чехла, двумя типами перекрытия сечения ячеек пластинами, а также расположением в данной области уголков жесткости и дополнительных угловых ребер жесткости дистанционирующих решеток, что привело к меньшей площади проходного сечения угловых ячеек и уменьшенным размерам зазора между твэлами (см. рис. 5).

На аксиальную скорость потока в периферийных ячейках, удаленных от уголков жесткости, влияет расположение пластин решетки. На расстоянии $L/d_r \approx 1.0$ от решетки безразмерная скорость в ячейках без пластин в центре и при их наличии составила 0.80–0.90 и 0.40–0.75 соответственно, а на расстоянии $L/d_r \approx 10.0$ эта скорость достигала 0.9–1.0 и 0.50–0.80, что свиде-

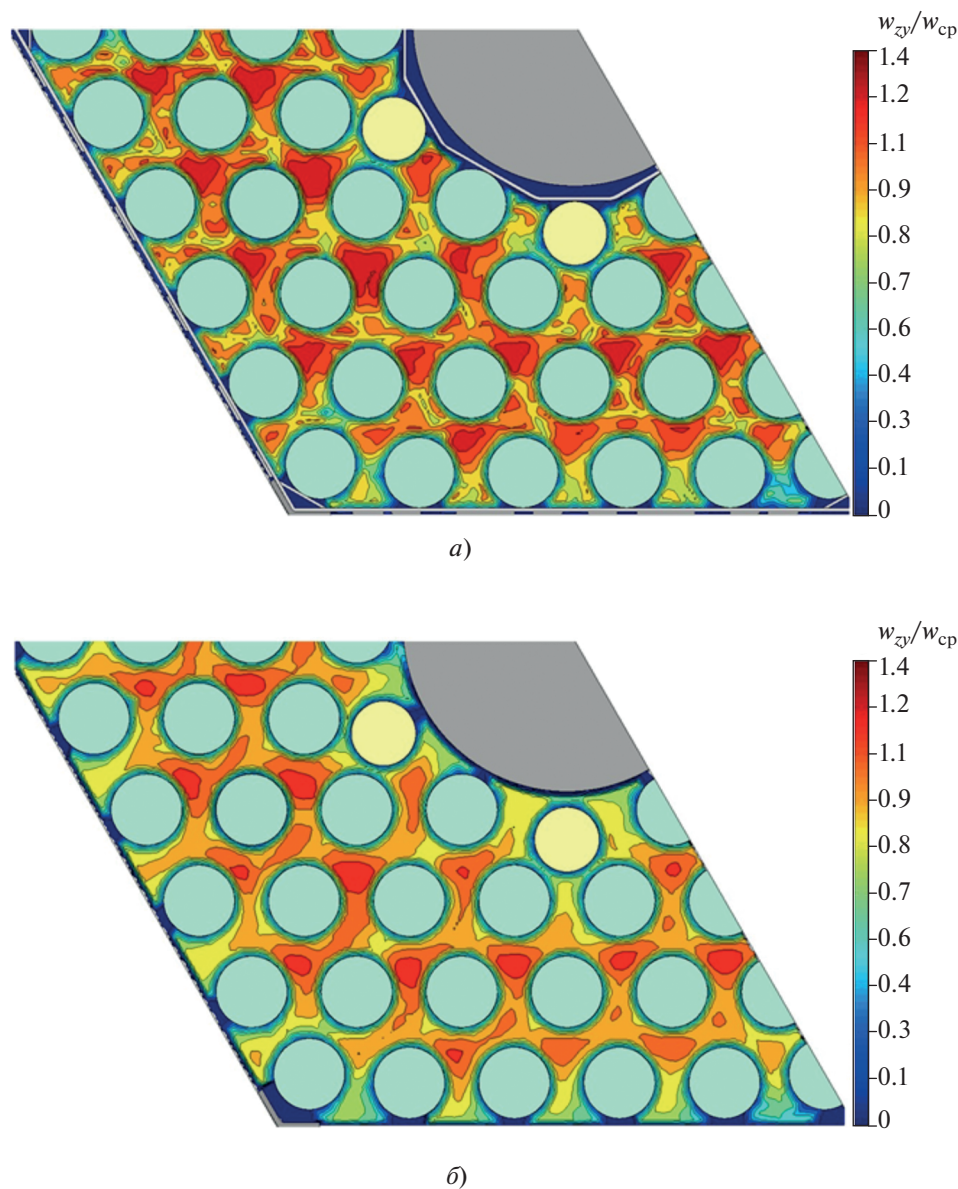


Рис. 5. Поля аксиальной скорости потока w_{zv}/w_{cp} на расстоянии от пластин решетки $L/d_r = 1.0$ (а) и 8.0 (б)

тельствует о низкой степени выравнивания поля скорости потока (см. рис. 5).

Наименьшая скорость движения потока наблюдалась в угловых ячейках с пластинами решетки в центре, безразмерная скорость в них на расстоянии $L/d_r \approx 1.0$ составила 0.3–0.6, а на расстоянии $L/d_r \approx 10.0$ оказалась равной 0.4–0.7. В угловых ячейках без пластин безразмерная аксиальная скорость потока была выше на расстоянии как $L/d_r \approx 1.0$, так и $L/d_r \approx 10.0$ и достигала 0.6–0.8 и 0.8–0.9 соответственно (см. рис. 5).

Скорость аксиального потока у вытеснителя была выше, чем на периферии, ее безразмерное значение на расстояниях $L/d_r \approx 1.0$ и $L/d_r \approx 10.0$ от решетки составило 0.8–1.1 и 0.75–0.90 соответ-

ственно (см. рис. 5). На структуру аксиального потока в области центрального вытеснителя схема расположения пластин влияла несущественно, что подтверждается небольшими диапазонами значений безразмерной скорости. Определяющее воздействие на аксиальный поток у центрального вытеснителя оказывали поперечные течения, направленные в поле регулярных ячеек, что обусловило некоторое снижение аксиальной скорости на расстоянии $L/d_r \approx 10.0$ от решетки (см. рис. 5).

В структуре потока, проходящего через дивергентную решетку, можно выделить три характерные области, различающиеся по значению аксиальной скорости на 20–30%: область регулярных ячеек, область вытеснителя и

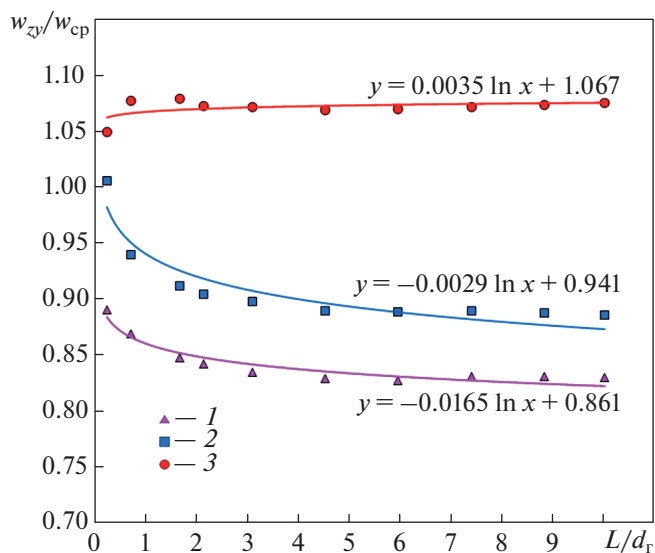


Рис. 6. Распределение аксиальной скорости потока w_{zv}/w_{cp} по длине твэльного пучка за дистанционирующей решеткой.
1 – периферийная область; 2 – область вытеснителя; 3 – область регулярных ячеек

периферийная область (рис. 6). На рисунке видно, что аксиальная скорость потока снижается на периферии, а также возле центрального вытеснителя и повышается в поле регулярных ячеек. Такое изменение аксиальной скорости свидетельствует о перераспределении расхода потока между этими областями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИНЖЕКЦИИ КОНТРАСТНОЙ ПРИМЕСИ

В поле регулярных ячеек, удаленных от трубы центрального вытеснителя и чехла ТВС, поперечные потоки между ячейками и, как следствие, перемешивание теплоносителя низкоинтенсивны. На процесс перемешивания теплоносителя в поле регулярных ячеек геометрические характеристики пластин дистанционирующей решетки не оказывали значительного влияния. Это подтверждается схожестью структур распределения примеси, показанных на рис. 7. Наличие примеси

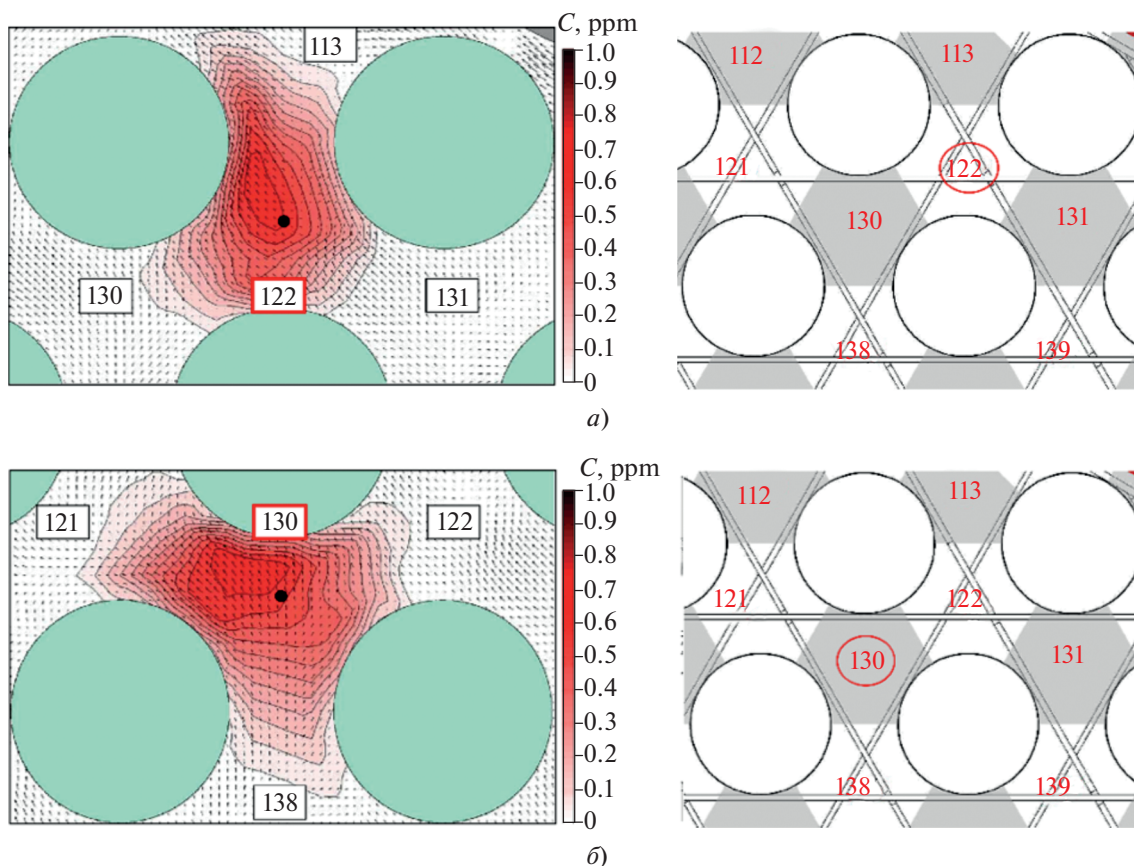


Рис. 7. Картограммы распределения контрастной примеси C в регулярных ячейках с пересечением пластин (а) и без их пересечения (б)

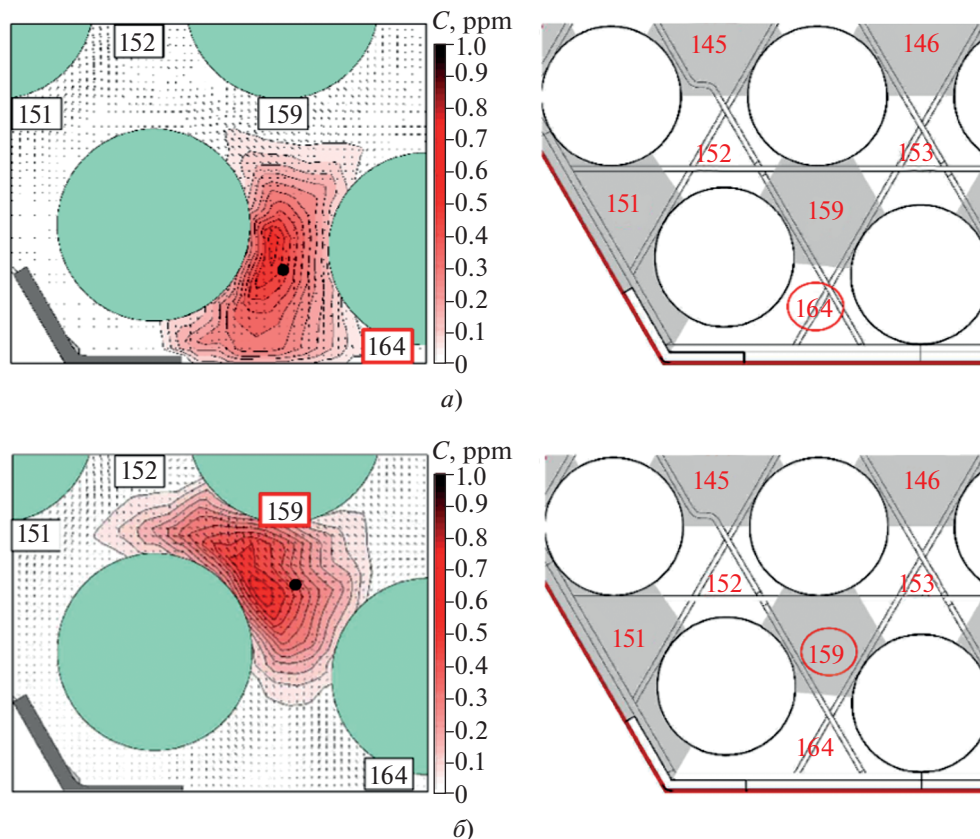


Рис. 8. Картограммы распределения контрастной примеси C возле чехла ТВС в ячейке, примыкающей к чехлу ТВС с пересечением пластин (а) и примыкающей к регулярной ячейке без пересечения пластин (б)

фиксирувалось только в пределах индивидуальных ячеек.

Течение потока в области регулярных ячеек, близких к трубе центрального вытеснителя, находилось под влиянием поперечных течений из области вытеснителя, что можно обосновать асимметричностью распределения примеси (см. рис. 7). Примесь находилась преимущественно в зазорах между твэлами, удаленными от вытеснителя. Это также подтверждает значительные размеры области влияния поперечных течений из области вытеснителя, охватывающей часть поля регулярных ячеек.

Направленность поперечных течений теплоносителя на периферии ТВС во многом определялась схемой расположения пластин решетки. В периферийных ячейках с пересечением пластин поперечные потоки были направлены в регулярные ячейки, поперечное перетекание теплоносителя вдоль поверхности чехла ТВС отсутствовало. Обратные поперечные потоки из регулярных ячеек в периферийные не фиксировались (рис. 8). В свою очередь, в периферийных ячейках без пересечения пластин поперечные потоки были ориентированы

в обратном направлении — из поля регулярных ячеек на периферию, при этом наблюдалось поперечное перетекание теплоносителя вдоль поверхности чехла ТВС. Также отмечалось наличие обратных течений из поля регулярных ячеек на периферию (рис. 9).

На течение теплоносителя возле центрального вытеснителя определяющее влияние оказывал поперечный круговой поток, направленный вдоль его поверхности. Это круговое течение уносило часть аксиального потока теплоносителя из ячеек, расположенных возле вытеснителя, а также несколько изменяло структуру поперечного потока, направленного в поле регулярных ячеек. Структура поперечных течений теплоносителя представлена на рис. 10.

ВЫВОДЫ

1. В твэльном пучке ТВС течение теплоносителя имеет значительную неоднородность, обусловленную сложной геометрической формой твэльного пучка и дистанционирующих решеток,

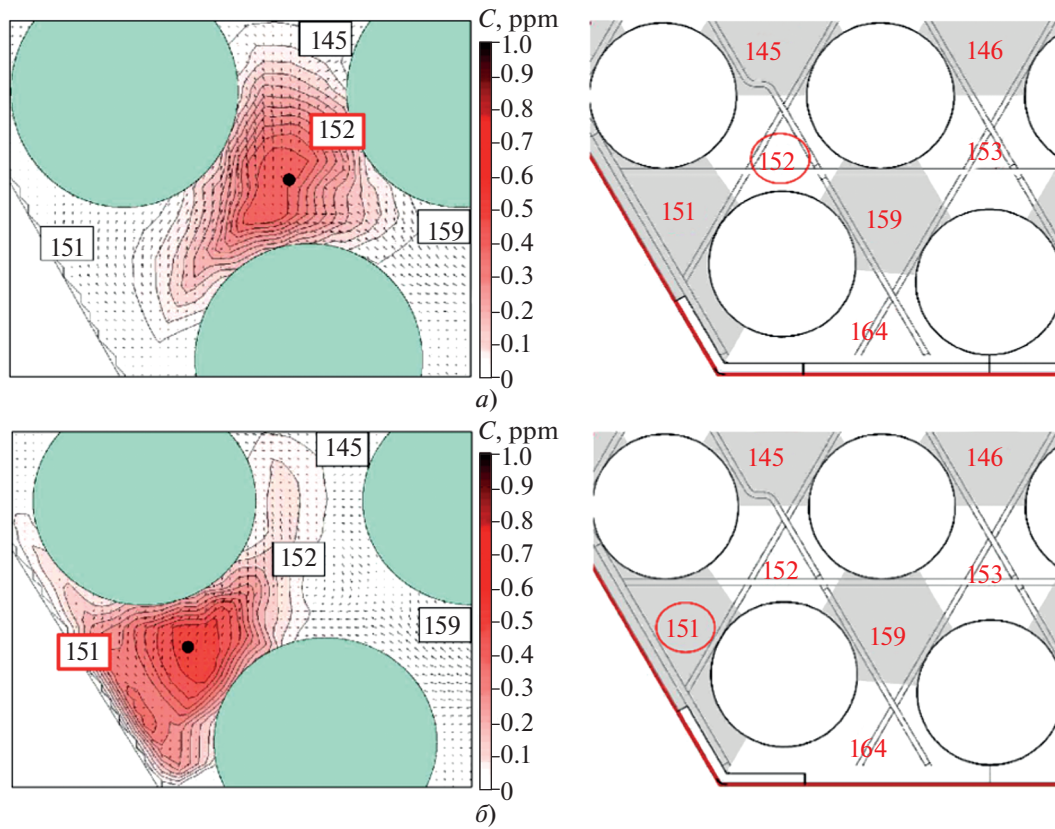


Рис. 9. Картограммы распределения контрастной примеси C возле чехла ТВС в ячейке, примыкающей к чехлу ТВС, без пересечения пластин (а) и в регулярной ячейке с пересечением пластин (б)

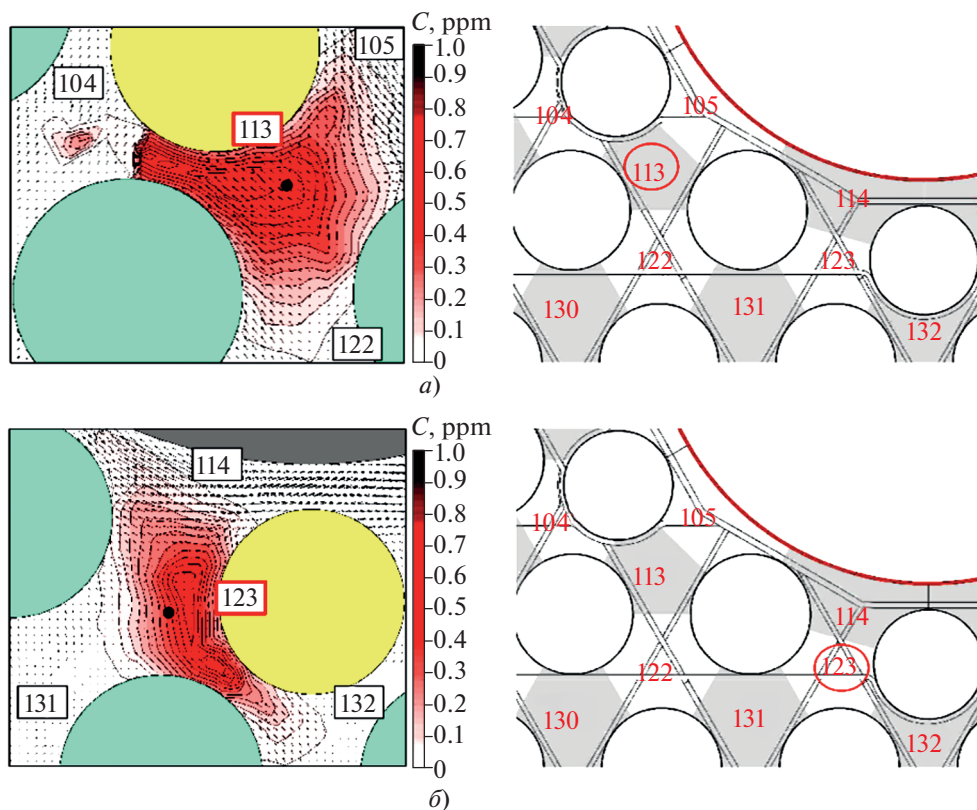


Рис. 10. Картограммы распределения контрастной примеси C возле центрального вытеснителя в ячейках впрыска примеси без пересечения пластин (а) и с их пересечением (б)

а также наличием чехла ТВС, центрального вытеснителя и уголков жесткости.

2. У чехла ТВС аксиальное течение потока имеет наименьшую скорость, локальные минимумы аксиальной скорости фиксируются в области уголков жесткости, усредненная безразмерная скорость составляет 0.3–0.7. Процесс выравнивания аксиальной скорости потока между уголкового областью и полем регулярных ячеек идет с малой интенсивностью.

3. За пластинами решетки аксиальный поток в поле регулярных ячеек неоднороден, выравнивание структуры аксиального потока в регулярных ячейках происходит на расстоянии $L/d_r \approx 10.0$ от пластин решетки.

4. У центрального вытеснителя аксиальная скорость потока снижается и имеет безразмерное значение в диапазоне 0.75–0.90, что обусловлено поперечными течениями, направленными в поле регулярных ячеек.

5. В аксиальном потоке можно выделить три области со скоростями, различающимися на 25–30%: регулярные ячейки, область вытеснителя и периферийная область.

6. Схема расположения пластин решеток оказывает существенное влияние на структуру аксиального потока во всех областях пучка ТВЭЛов, а на образование поперечных течений теплоносителя воздействует только в периферийной области у чехла ТВС.

7. Выявленные особенности течения потока теплоносителя следует учитывать при обосновании теплотехнической надежности с использованием ячейковых теплогидравлических кодов. Необходимо усовершенствовать методику теплогидравлического расчета путем увеличения числа типов расчетных ячеек с учетом неоднородности течения потока по областям ТВЭЛового пучка и типам ячеек, модернизации матрицы перемешивания теплоносителя на основе результатов экспериментальных исследований, выполненных с использованием метода инъекции контрастной примеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Реакторные** установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние / Д.Л. Зверев, Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов, В.Ю. Галицких, В.И. Полуничев, К.Б. Вешняков, С.В. Кабин, А.Ю. Турусов // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 29–37.
2. **Петрунин В.В.** Реакторные установки для атомных станций малой мощности // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 6. С. 528–540. <https://doi.org/10.31857/S0869587321050182>
3. **Опыт** создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития / В.М. Беляев, М.А. Большухин, А.Н. Пахомов, А.М. Хизбуллин, А.Н. Лепехин, В.И. Полуничев, К.Б. Вешняков, А.Н. Соколов, А.Ю. Турусов // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 37–43.
4. **Активные** зоны действующих атомных ледоколов / Д.Л. Зверев, О.Б. Самойлов, О.А. Морозов, А.А. Захарычев, В.Ю. Силаев, П.Б. Матяш, А.Ю. Вишнев, М.М. Кашка, О.Э. Дарбинян // Судостроение. 2020. № 1. С. 13–16.
5. **Методические** вопросы и некоторые результаты экспериментальных и расчетных исследований критических тепловых потоков в ТВС реактора РИТМ-200 для АСММ / А.А. Захарычев, Г.Ш. Иксанова, А.В. Куприянов, А.Б. Осин, В.В. Петрунин, О.Б. Самойлов, Д.Л. Шипов // Атомная энергия. 2021. Т. 130. Вып. 2. С. 63–68.
6. **Романов А.И., Папотин В.Ю., Тутуркин М.Ю.** Разработка активных зон для АСММ и ПЭБ. Текущее состояние и направления развития // ВАНТ. Сер.: Материаловедение и новые материалы. 2023. Вып. 5. С. 86–111.
7. **К вопросу** о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А.А. Баринов, С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов, О.Б. Самойлов // Атомная энергия. 2016. Т. 120. Вып. 5. С. 270–275.
8. **Расчетно-экспериментальные** исследования течения потока теплоносителя в кассетной активной зоне реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // ИФЖ. 2017. Т. 90. № 4. С. 988–996.
9. **Экспериментальные** исследования локальной гидродинамики теплоносителя на масштабной модели кассетной ТВС реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев, А.А. Баринов, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 41–48. <https://doi.org/10.1134/S004036361608004X>
10. **Экспериментальные** исследования гидродинамики потока теплоносителя за дистанционирующей и перемешивающей решетками ТВСА-12PLUS реактора ВВЭР-1000 / С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов, Ю.П. Сухарев // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2017. № 1. С. 126–134.
11. **Гухман А.А.** Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973.

Coolant Hydrodynamics in a Fuel-Rod Bundle of a Fuel Assembly in the RITM Reactor of the Retrofitted Floating Power Unit

S. M. Dmitiriev^a, T. D. Demkina^a, A. A. Dobrov^a, D. V. Doronkov^{a,*}, A. N. Pronin^a, and A. V. Ryazanov^a

^a *Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^{*}*e-mail: nevid000@mail.ru*

Abstract—Results are presented of the experimental investigation into peculiarities of the coolant flow in a fuel-rod bundle of a fuel assembly in the RITM reactor of the retrofitted floating power unit. The purpose of this study was to experimentally determine hydrodynamic characteristics of the flow in a fuel-rod bundle of a fuel assembly. The experiments were performed in an experimental facility with air as a working fluid using a model of a fragment of a fuel-rod bundle in a fuel assembly on the basis of the hydrodynamic simulation theory. The experimental model included a bundle of fuel-rod simulators, burnable poison rod simulators, spacer grids simulators, a central displacer, and stiffening angles. Invasive methods, such as the pneumometric method and the method of tracer injection, were employed in the study. The flow features were visualized using axial and tangential velocity maps and the tracer distributions. The experiments revealed the axial flow features and the structure of transverse coolant flows. Three zones are identified in the flow structure: in the region of regular cells, at the central displacer, and at the periphery (near the fuel-assembly casing). The flow velocity in them differs by 25–30%. The arrangement of plates in the grids considerably affects the flow structure at a distance greater than $L/d_h \approx 10.0$. The found flow features should be taken into account in substantiating the thermal reliability of new cassette-type cores using cellular thermohydraulic codes. The procedure of thermohydraulic calculation in cellular thermohydraulic codes should be revised to increase the number of types of calculation cells and to consider the flow maldistribution among the regions in a fuel-rod bundle and the cell types.

Keywords: fuel assembly, fuel-rod bundle, spacer grid, fuel-assembly tube, central displacer, coolant hydrodynamics, axial velocity, tangential velocity, tracer, flow