ГИДРОДИНАМИКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В ТВС РЕАКТОРА ТИПА РИТМ АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ¹

© 2024 г. С. М. Дмитриев^{*a*}, Т. Д. Демкина^{*a*}, А. А. Добров^{*a*}, Д. В. Доронков^{*a*}, *, Д. С. Доронкова^{*a*}, А. Н. Пронин^{*a*}, А. В. Рязанов^{*a*}

^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 28.10.2023 г. После доработки 22.11.2023 г. Принята к публикации 29.11.2023 г.

Представлены результаты экспериментального изучения особенностей процесса формирования потока теплоносителя во входном участке тепловыделяющей сборки (ТВС) активной зоны реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности (АСММ). Цель работы – оценить влияние разных элементов конструкции входного участка на формирование потока теплоносителя. Для достижения этой цели завершена серия опытов на исследовательском аэродинамическом стенде с воздушной рабочей средой с использованием масштабной экспериментальной модели, включающей в себя элементы конструкции входного участка ТВС от дроссельной шайбы до узла крепления твэлов к диффузору, а также фрагмент твэльного пучка между поглощающей и дистанционирующей решетками. Исследования проведены с помощью пневмометрического метода и метода инжекции контрастной примеси в нескольких сечениях по длине модели. Измерения выполнены по всему поперечному сечению модели. Особенности течения теплоносителя визуализированы картограммами аксиальной скорости потока рабочей среды и распределения примеси в поперечном сечении модели. Результаты исследований применялись специалистами конструкторских и расчетных подразделений ОКБМ им. И.И. Африкантова для обоснования инженерных решений при проектировании новых активных зон реакторов РИТМ. Итоги экспериментов собраны в базу данных и использованы при валидации CFD-программы ЛОГОС, созданной сотрудниками РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИТМФ МГУ им. М.В. Ломоносова в качестве аналогов иностранных программ такого же класса, к которым относятся ANSYS, Star CCM+ и многие другие. К опытным данным также обращались при валидации одномерных теплогидравлических кодов, применяемых в ОКБМ им. И.И. Африкантова при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторных установок. К этому классу программ причисляется и теплогидравлический код КАНАЛ.

Ключевые слова: топливная кассета, входной участок, дроссельная шайба, шариковый замок, диффузор, твэльный пучок, поглощающая и дистанционирующая решетки, чехол, центральный вытеснитель, гидродинамика теплоносителя, аксиальная скорость, контрастная примесь **DOI:** 10.56304/S0040363624050059

Одна из важных задач развития России – освоение ресурсов Арктики. Становление этого региона невозможно без энергетических источников, обладающих такими качествами, как автономность, надежность и маневренность. Научный, конструкторский и производственный опыт, накопленный в атомной отрасли при разработке судовых реакторных установок (РУ) [1], лежит в основе одного из проектов Госкорпорации "Росатом" – атомных станций малой мощности [2, 3].

В настоящее время ведутся конструкторские исследования по созданию АСММ с новейшей

РУ РИТМ-200Н, разработанной в ОКБМ им. И.И. Африкантова. Проектом РУ предусматривается кассетная активная зона с топливом повышенной ураноемкости для увеличения энергоэффективности станции [4].

При конструировании ТВС новой кассетной активной зоны использовался опыт создания и эксплуатации топливных сборок РУ современных атомных ледоколов. Необходимо экспериментально определить влияние отдельных элементов входного участка ТВС, а именно дроссельной шайбы, на структуру поля аксиальной скорости потока на входе в активную часть твэльного пучка. Из-за особенностей конструкции входного участка ТВС могут изменяться поля аксиальной

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

скорости потока и, как следствие, условия работы элементной базы активной зоны, что, в свою очередь, может повлиять на ее теплотехническую надежность [5].

При обосновании теплотехнической надежности [6] используется теплогидравлический расчет, требующий уточнения гидродинамических характеристик потока, к которым относится поле аксиальной скорости теплоносителя. Таким образом, учитывая особенности конструкции кассетной активной зоны, необходимо провести комплекс научно-исследовательских работ, в том числе экспериментально изучить поля аксиальной скорости потока во входном участке TBC.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Моделирование течения теплоносителя на входе в ТВС осуществлялось на аэродинамическом стенде в Институте ядерной энергетики и технической физики им. академика Ф.М. Митенкова НГТУ им. Р.Е. Алексеева [7–9]. Установка выполнена в виде разомкнутого контура с воздушной рабочей средой и включает в себя систему нагнетания воздушного потока, экспериментальные модели и измерительный комплекс. Для моделирования течения водного теплоносителя использовался воздух в соответствии с теорией гидродинамического подобия [10]. Рабочие параметры исследовательской установки: среда – воздух, производительность вентилятора – 18540 м³/ч, полное давление в ресиверной емкости – 6 кПа.

Модель представляет собой канал, состоящий из двух участков разной формы: круглой и шестигранной. Круглый канал имитирует сегмент входного участка, расположенный внутри нижней опорной плиты реактора, а шестигранный канал — начальный участок твэльного пучка (рис. 1).

Канал круглой формы включает в себя макет обтекателя трубы центрального вытеснителя с закрепленным на нем макетом проточной части шарикового замка. Во фланцевом соединении канала круглой формы установлена дроссельная шайба. Канал шестигранной формы состоит из имитатора диффузора с узлом крепления твэлов к нему и уголками жесткости, имитатора трубы центрального вытеснителя, фрагмента твэльного пучка и макетов поглощающей и дистанционирующей решеток. Все элементы экспериментальной модели увеличены на коэффициент геометрического подобия 5.79 относительно натурного объекта.

В составе исследовательского стенда модель располагается не вертикально, как ТВС в активной зоне реактора, а горизонтально. Такое положение модели в данном случае не приводит к изменению профиля безразмерной скорости потока по двум причинам:

все этапы исследований проводились опытным путем при развитом турбулентном движении воздушной рабочей среды на исследовательском стенде, что подтверждается относительно большим значением числа Рейнольдса;

при постановке экспериментов отсутствовали процессы нагрева и теплообмена, так как изучались только особенности гидродинамики потока.

ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выбор оптимальной формы экспериментальной модели и последующий перенос характеристик потока, полученных при проведении опытов, на натурные условия течения теплоносителя



Рис. 1. Экспериментальная модель входного участка ТВС

возможны при выполнении гидродинамического подобия, которое требует одновременного соблюдения условий геометрического, кинематического и динамического подобия.

Геометрическое подобие обеспечивается соответствием геометрических размеров модели и натурного объекта с учетом масштабного коэффициента, составляющего 5.79. Использование такого большого коэффициента и, как следствие, имитаторов твэлов диаметром 40 мм обусловлено следующими факторами:

необходимостью расширения гидравлического диаметра модели (это требуется для установления высокого значения числа Рейнольдса воздушной рабочей среды в моделях, достаточного для гарантированного автомодельного движения потока);

минимизацией затеснения площади проходного сечения областей, где проводятся замеры, и влияния средств измерения на движение потока.

Динамическое подобие процесса движения сред в геометрически подобных элементах конструкции обеспечивается при поддержании близких чисел Рейнольдса, максимальное значение которых в модели составило 65000, а в штатном объекте – 90000.

Кинематическое подобие процессов движения сред в геометрически подобных элементах конструкции достигается путем соблюдения пропорциональности безразмерных скоростей в соответствующих точках в модели и штатной конструкции. Для этого необходимо провести опытные исследования в зоне автомодельного движения потока воздушной рабочей среды.

Полученные значения числа Рейнольдса в экспериментальной модели соответствуют зоне автомодельного движения воздушного потока, под которой подразумевается режим движения среды в канале этой модели, протестированной на исследовательском стенде. Данный режим характеризуется одинаковым безразмерным профилем относительной скорости потока как для водного теплоносителя реакторной установки, так и для воздушного потока. Следовательно, результаты опытов могут быть использованы для анализа характеристик течения теплоносителя в штатной активной зоне ядерного реактора. Все измерения проводились при среднерасходной скорости воздушной рабочей среды на входе в модель, равной 13.0-24.5 м/с, и числах Рейнольдса 35000-65000.

Начало зоны автомодельного течения воздушного потока определяется экспериментально на основе построения зависимости:

сопротивления трения пучка гладких труб от числа Рейнольдса; коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) макетов дистанционирующей решетки и дроссельных шайб от числа Рейнольдса.

Анализ указанных зависимостей показывает, что начиная с некоторого значения числа Рейнольдса сопротивление трения пучка гладких труб и КГС макетов дистанционирующей решетки и дроссельных шайб перестает существенно изменяться. Это свидетельствует о начале зоны автомодельного течения воздушного потока. При проведении экспериментов зона автомодельного течения потока воздушной рабочей среды начиналась в диапазоне чисел Рейнольдса 15000– 20000.

Результаты измерения КГС макетов дистанционирующей решетки и дроссельных шайб показали также их соответствие значениям КГС, полученным для штатных элементов конструкции ТВС при одинаковых значениях числа Рейнольдса.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Процесс перестроения поля аксиальной скорости потока был изучен с помощью пневмометрического метода, суть которого — определить осевую скорость воздушного потока пневмометрическим датчиком. Анализ погрешности измерения скорости потока рабочей воздушной среды показал, что среднеквадратические отклонения аксиальной скорости, полного и статического давлений в исследуемой точке равны 0.69 м/с, 25.6 и 11.4 Па соответственно, а их предельные отклонения не превышают 0.87 м/с (не более 7.5% абсолютной скорости), 76.8 и 34.2 Па.

Рассматривалась осевая скорость в пяти сечениях (рис. 2) по длине экспериментальной модели: за дроссельной шайбой (сечение V1), за шариковым замком (сечение V2), в узле крепления твэлов к диффузору (сечение V3), в твэльном пучке за поглощающей решеткой (сечение V4) и в твэльном пучке перед дистанционирующей решеткой (сечение V5). Примеры расположения точек измерения (расположены идентично) в сечениях V1 (за дроссельной шайбой), V4 и V5 (в твэльном пучке на разном удалении от диффузора входного участка) представлены на рис. 3.

Интегральная картина поперечного перетекания потока теплоносителя изучена с помощью метода инжекции контрастной примеси, позволяющего выявить общую направленность поперечных потоков. В качестве примеси использовали пропан, который с определенным расходом подавали в область впрыска, расположенную в узле крепления твэлов-имитаторов к диффузору, после чего отслеживали его распространение в модели. В поперечном сечении модели выбраны две области впрыска примеси: на периферии и



Рис. 2. Продольные координаты сечений измерения. z = 0 – нулевая точка отсчета



Рис. 3. Примеры расположения точек измерения:

a – за дроссельной шайбой (сечение V1); *б* – в твэльном пучке за поглощающей решеткой (сечение V4) и перед дистанционирующей решеткой (сечение V5). Диапазон значений слева и справа от рисунков – номера точек измерения

возле трубы центрального вытеснителя (рис. 4). Такой выбор позволяет охарактеризовать процесс формирования поперечных потоков практически по всему сечению твэльного пучка.

Поддержание необходимого расхода газа осуществлялось с погрешностью не более 0.25%. Концентрацию примеси в точке измерения определяли с помощью газоанализатора. Диапазон концентраций газа составлял 0–10000 ppm. Погрешность измерения прибора равнялась ± 15 ppm в диапазоне концентраций от 0 до 1000 ppm и $\pm 1.5\%$ в диапазоне от 1000 до 10000 ppm.

Концентрация контрастной примеси была измерена только в пучке твэлов-имитаторов в сечениях V4 и V5 (см. рис. 2). Особенности течения теплоносителя во входном участке ТВС выявлялись на основе анализа картограмм распределения безразмерной аксиальной скорости потока $W_z/W_{\rm cp}$ и распространения примеси в поперечном сечении модели.

Значения W_z/W_{cp} получены нормированием локального значения безразмерной аксиальной скорости W_z в точке ее измерения на среднерасходную скорость воздушной рабочей среды W_{cp} на входе в модель. Далее в статье используется только безразмерная аксиальная скорость. Концентрация примеси представлена на картограммах в абсолютных значениях.

Столь широкий диапазон значений среднерасходной скорости потока и числа Рейнольдса обу-



Рис. 4. Расположение области подачи контрастной примеси в модели. Сечение: *a* – продольное; *б* – поперечное.

I – сечение впрыска контрастной примеси; впрыск контрастной примеси: *I* – в периферийную область, *2* – возле трубы центрального вытеснителя

словлен проведением двух этапов экспериментальных исследований:

при полностью открытом проходном сечении дроссельной шайбы, что соответствует максимальным значениям скорости и числа Рейнольдса;

при частично перекрытом проходном сечении дроссельной шайбы при повороте ее дисков один относительно другого на 15°, что соответствует минимальным значениям скорости и числа Рейнольдса.



гис. 5. Конструкции дроссельных шаио: оез дополнительных отверстий (a, δ) и с дополнительными отверстиями (b, c).

Угол поворота дисков, град: *a*, *в* – 0; *б*, *г* – 15

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 5 2024

При постановке опытов были задействованы дроссельные шайбы, конструкции которых различаются количеством отверстий и, соответственно, площадью проходного сечения (рис. 5).

Распределение поля аксиальной скорости потока на входе в ТВС при полностью открытом и частично перекрытом проходном сечении дроссельных шайб было изучено для того, чтобы получить точную экспериментальную информацию о поле аксиальной скорости потока в тепловыделяющих сборках, установленных в центральной части и на периферии кассетной активной зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ результатов исследований распределения аксиальной скорости потока теплоносителя на входе в TBC, частичное описание первого этапа которых приведено в [11], с использованием пневмометрического метода позволил сделать следующие выводы.

1. За отверстиями дроссельных шайб образуются струйные течения теплоносителя. Локальные максимумы безразмерной аксиальной скорости потока располагаются по центрам отверстий, значение этой скорости в отверстиях шайб, имеющих дополнительные отверстия, составляет 2.2-2.6, без них - 3.6-4.2. За шайбой без дополнительных отверстий образуются обширные области с низкой аксиальной скоростью потока. безразмерное значение которой лежит в диапазоне 0.2–0.4. Наличие дополнительных отверстий в шайбе привело к существенному сокращению области с низкой скоростью потока, усредненное значение безразмерной аксиальной скорости в областях, лежащих вне проходных отверстий, составляло 1.2-1.4. Небольшие области с низкой



Рис. 6. Безразмерная аксиальная скорость потока за дроссельными шайбами с углом поворота дисков 0° . Конструкция шайб: a - 6ез дополнительных отверстий; $\delta - c$ дополнительными отверстиями

безразмерной скоростью потока 0.5–0.8 за шайбой с дополнительными отверстиями расположены вокруг центрального отверстия и на периферии канала (рис. 6).



Рис. 7. Безразмерная аксиальная скорость потока W_z/W_{cp} за дроссельной шайбой с дополнительными отверстиями с углом поворота дисков 15°

2. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы способствовало значительному расширению области с низкой аксиальной скоростью потока, двукратному увеличению аксиальной скорости истечения потока из отверстий и частичному разрушению струйного течения при изменении формы отверстий, выразившемуся в смещении локального максимума скорости от центрального положения в сечении отверстий дроссельных шайб (рис. 7).

3. За шариковым замком наблюдается неоднородность поля аксиальной скорости потока теплоносителя, зависящая от конструкции шайбы и степени перекрытия ее проходного сечения. При установке дроссельной шайбы с дополнительными отверстиями неоднородность аксиальной скорости наименьшая, безразмерная скорость в проходном сечении шарикового замка соответствует 1.7-2.2. Если у шайбы нет дополнительных отверстий, неоднородность скорости существенно возрастает и равняется 1.5-2.4. Струйные течения теплоносителя измерительными приборами не фиксируются (рис. 8, *a*, δ).

4. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельных шайб обоих типов привело к образованию струйных потоков за ребрами шарикового замка. Наиболее ярко данный процесс проявился при использовании шайбы без дополнительных отверстий. В струйных течениях безразмерная аксиальная скорость составила 2.6–3.2, а локальные максимумы аксиальной скорости были смещены



Рис. 8. Безразмерная аксиальная скорость потока за шариковым замком и дроссельными шайбами с углом поворота дисков 0° (a, b) и 15° (b, c).

Конструкция шайб: а, в – без дополнительных отверстий; б, г – с дополнительными отверстиями

относительно отверстий шайбы. При установке шайбы с дополнительными отверстиями локальные максимумы скорости располагались в проточной части шарикового замка, а значения безразмерной аксиальной скорости соответствовали 2.0–2.4 (рис. 8, *в*, *г*). Таким образом, при перекрытии проходного сечения дроссельных шайб увеличивается продолжительность струйного течения теплоносителя за ними, что, в свою очередь, может оказать влияние на структуру потока на входе в твэльный пучок.

5. В узле крепления твэлов к диффузору течение теплоносителя приобретает ярко выраженную неоднородность, которая определяется конструкцией не только диффузора, но и дроссельной шайбы. На периферии поперечного сечения твэльного пучка наблюдается обширная область с низкими значениями безразмерной аксиальной скорости

потока, равными 0.2-0.7. Скорость потока в этой области практически не зависит от конструкции шайб и степени перекрытия их проходного сечения. Столь малые значения скорости обусловлены наличием глухой стенки в выходной части диффузора, а также замедлением потока при его контакте с поверхностью чехла ТВС. Область низкой аксиальной скорости потока охватывает два ряда твэлов от чехла в углах и один ряд у граней шестигранника (рис. 9, а, б). В области проходного сечения диффузора безразмерная аксиальная скорость потока неоднородна, ее значение варьируется в диапазоне от 0.7 до 1.8. Возле центрального вытеснителя аксиальная скорость потока мала (0.7-1.0), что обусловлено торможением потока у поверхности трубы. Между ребрами диффузора, отклоненными одно относительно другого на угол 110°, фиксируется локальный максимум безразмерной аксиальной скорости потока. составляющий 1.5-1.8. Это явление характерно для обоих типов дроссельных шайб (рис. 9, в, г).

6. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы с дополнительными отверстиями не привело к существенному изменению структуры аксиального течения потока на выходе из диффузора в области крепления твэлов (см. рис. 9, δ , ϵ). При частичном перекрытии проходного сечения шайбы без дополнительных отверстий наблюдалось изменение структуры потока теплоносителя, а также расширение области с низкой аксиальной скоростью потока у поверхности чехла, охватывающей до двух рядов твэлов. Помимо этого, образовалось множество локальных максимумов безразмерной аксиальной скорости в области проходного сечения диффузора, значения которой составили 1.5-2.1, что свидетельствует о наличии струйных течений теплоносителя из отверстий шайбы (см. рис. 9, а, в). Таким образом, частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы, не имеющей дополнительных отверстий, привело к образованию мощных струйных потоков теплоносителя на значительном расстоянии от шайбы.

7. В твэльном пучке за поглощающей решеткой образуются две области с низкой аксиальной скоростью потока, охватывающие два ряда твэлов от граней чехла, параллельных пластинам крепления твэлов к диффузору. Скорость в этих областях равняется 0.3–0.6. Наибольшие аксиальные скорости потока (1.5–1.9) фиксируются вокруг трубы центрального вытеснителя, что обусловлено конструкцией поглощающей решетки, в центральной части которой отсутствуют ребра. По этой причине бо́льшая часть аксиального расхода теплоносителя приходится на центрального течения теплоносителя характерна для дроссельных шайб обеих конструкций при полностью открытом проходном сечении.

8. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы без дополнительных отверстий привело к росту безразмерной аксиальной скорости потока до 2.0 в твэльном пучке за поглощающей решеткой вокруг центрального вытеснителя. При этом наблюдалось ее уменьшение в основной части твэльного пучка на 10-15%. Структура двух областей с малой аксиальной скоростью потока на периферии твэльного пучка не изменилась, однако произошло снижение аксиальной скорости в них в среднем на 10% (см. рис. 10, а, в). Частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы с дополнительными отверстиями не оказало существенного влияния на структуру потока в пучке твэлов за поглощающей решеткой (см. рис. 10, б, г).

9. При движении потока в твэльном пучке происходит низкоинтенсивный процесс выравнивания поля аксиальной скорости. Перед дистанционирующей решеткой сохраняются ярко выраженные области с малой аксиальной скоростью потока, находящиеся напротив двух граней чехла ТВС, параллельных пластинам крепления твэлов к диффузору, и охватывающие один периферийный ряд твэлов. Относительная аксиальная скорость потока в данных областях составляет 0.6-0.8. Вокруг трубы центрального вытеснителя аксиальная скорость потока выше и соответствует диапазону 1.2-1.5. В оставшейся области проходного сечения твэльного пучка относительная аксиальная скорость потока равна 0.9-1.3. Структура аксиального течения теплоносителя перед дистанционирующей решеткой слабо зависит от конструкции дроссельных шайб при полностью открытом их проходном сечении (рис. 11, *a*, б).

10. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы с дополнительными отверстиями не оказало существенного влияния на структуру аксиального потока и его скорость в пучке твэлов перед дистанционирующей решеткой (рис. 11, δ , ϵ). Частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы без дополнительных отверстий привело к росту аксиальной скорости потока вокруг центрального вытеснителя до 1.3–1.7. Безразмерная аксиальная скорость в периферийных рядах твэлов у граней чехла ТВС, параллельных пластинам крепления твэлов к диффузору, не изменилась. В оставшейся области проходного сечения твэльного пучка относительная аксиальная скорость потока составила 0.8-1.1 (рис. 11, a, b). Выявленное распределение аксиальной скорости потока теплоносителя указывает на наличие влияния степени перекрытия проходного сечения дроссельной шайбы без дополни-



Рис. 9. Безразмерная аксиальная скорость потока в узле крепления твэлов к диффузору и за дроссельными шайбами с углом поворота дисков 0° (a, δ) и 15° (b, c).

Конструкция шайб: а, в – без дополнительных отверстий; б, г – с дополнительными отверстиями

тельных отверстий на течение теплоносителя в твэльном пучке.

При анализе результатов исследования распределения контрастной примеси в модели входного участка ТВС были сделаны следующие выводы.

1. Структура поперечных течений теплоносителя в периферийном ряду твэлов за поглощающей решеткой мало зависит от конструкции дроссельных шайб при полностью открытом их проходном сечении, что подтверждается идентичным распределением контрастной примеси по сечению пучка твэлов. При этом распределение примеси происходит преимущественно вдоль периферийного ряда твэлов параллельно пластинам крепления твэлов к диффузору, поскольку эти пластины создают локальное сопротивление поперечным течениям теплоносителя, направленным в сторону или от центрального вытеснителя (рис. 12, a, δ).

2. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы без дополнительных отвер-

13



Рис. 10. Безразмерная аксиальная скорость потока в пучке твэлов за поглощающей решеткой и дроссельными шайбами с углом поворота дисков 0° (a, δ) и 15° (b, c).

Конструкция шайб: а, в – без дополнительных отверстий; б, г – с дополнительными отверстиями

стий привело к дополнительной турбулизации потока в периферийном ряду, что визуализировано большей областью размытия примеси в поперечном сечении. Это подтверждает наличие влияния струйных течений из отверстий шайбы на структуру аксиального течения потока теплоносителя. Размытие примеси происходит вдоль периферийного ряда твэлов, на него (размытие примеси) также влияют пластины, посредством которых твэлы крепятся к диффузору. Частичное перекрытие проходного сечения шайбы с дополнительными отверстиями не оказало существенного воздействия на структуру поперечных потоков за поглощающей решеткой (см. рис. 12).

3. Перед дистанционирующей решеткой область распространения примеси охватила преимущественно периферийный ряд твэлов. Картины распределения примеси в поперечном сечении при установке дроссельных шайб обеих конструкций схожи (рис. 13, a, δ). Выявленное распределение примеси свидетельствует о низкой интенсивности процесса перемешивания теплоносителя



Рис. 11. Безразмерная аксиальная скорость потока в пучке твэлов перед дистанционирующей решеткой и дроссельными шайбами с углом поворота дисков $0^{\circ}(a, \delta)$ и $15^{\circ}(e, \epsilon)$. Конструкция шайб: *a*, *e* – без дополнительных отверстий; *б*, *e* – с дополнительными отверстиями

на начальном участке твэльного пучка до дистанционирующей решетки, а определяющее влияние на процесс перемешивания потока на участке твэльного пучка между поглощающей и дистанционирующей решетками оказывают пластины узла крепления твэлов к диффузору.

4. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы с дополнительными отверстиями не привело к существенному изменению структуры поперечных течений теплоносителя в твэльном пучке, что подтверждается идентичностью картин распределения примеси в поперечном сечении твэльного пучка (рис. 13, δ , ϵ). При перекрытии части проходного сечения дроссельной шайбы без дополнительных отверстий наблюдался заметный рост области распространения примеси в поперечном сечении пучка твэлов, охватывавшей два ряда твэлов, что свидетельствует о значительной турбулизации потока при образовании струйных течений из отверстий шайбы (рис. 13, a, b).



Рис. 12. Распределение контрастной примеси *C* в пучке твэлов за поглощающей решеткой и дроссельными шайбами с углом поворота дисков $0^{\circ}(a, \delta)$ и $15^{\circ}(a, \epsilon)$ при ее впрыске в периферийную область. Конструкция шайб: *a*, *s* – без дополнительных отверстий; *б*, *г* – с дополнительными отверстиями

5. В области центрального вытеснителя наблюдается образование поперечных течений теплоносителя в направлении периферийных рядов твэлов. Начало образования поперечных потоков фиксируется непосредственно за поглощающей решеткой. Наличие поперечных течений теплоносителя от центрального вытеснителя визуализировано картограммами, представленными на рис. 14.



Рис. 13. Распределение контрастной примеси *C* в пучке твэлов перед дистанционирующей решеткой и дроссельными шайбами с углом поворота дисков $0^{\circ}(a, \delta)$ и $15^{\circ}(s, c)$ при впрыске ее в периферийную область. Конструкция шайб: *a*, *s* – без дополнительных отверстий; *б*, *c* – с дополнительными отверстиями

6. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельных шайб привело к увеличению области размытия контрастной примеси и росту ее (примеси) концентрации с 900 до 1100 ppm (см. рис. 14, *в*, *г*). Это обусловлено незначительным снижением аксиальной скорости потока в области центрального вытеснителя из-за образования струйных течений теплоносителя из отвер-



Рис. 14. Распределение контрастной примеси *C* в пучке твэлов за поглощающей решеткой и дроссельными шайбами с углом поворота дисков $0^{\circ}(a, \delta)$ и 15° при впрыске ее возле трубы центрального вытеснителя. Конструкция шайб: *a*, *s* – без дополнительных отверстий; *б*, *c* – с дополнительными отверстиями

стий дроссельных шайб, которые дополнительно турбулизируют его поток на входе в пучок твэлов.

7. Перед дистанционирующей решеткой фиксируется обширная область размытия контрастной примеси, которая охватывает и периферийные ряды твэлов (рис. 15, *a*, *б*). Структура области распространения примеси обусловлена наличием мощных поперечных течений теплоносителя, направленных от трубы центрального вытеснителя к периферии TBC. Поперечные течения во мно-



Рис. 15. Распределение контрастной примеси *C* в пучке твэлов перед дистанционирующей решеткой и дроссельными шайбами с углом поворота дисков 0° (*a*, δ) и 15° при впрыске ее возле трубы центрального вытеснителя. Конструкция шайб: *a*, *в* – без дополнительных отверстий; δ , *г* – с дополнительными отверстиями

гом определяют процесс постепенного выравнивания поля аксиальной скорости потока по сечению пучка твэлов.

8. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельных шайб привело к дополнительной

Nº 5

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

турбулизации потока теплоносителя перед дистанционирующей решеткой, о чем свидетельствует расширение области размытия контрастной примеси в сечении пучка твэлов (рис. 15, β , ϵ). Таким образом, установка дроссельных шайб с

2024

частично перекрытым проходным сечением оказывает достаточно продолжительное по длине твэльного пучка влияние на структуру потока теплоносителя.

выводы

1. Входной участок ТВС оказывает существенное влияние на формирование потока теплоносителя: в периферийных рядах твэлов у граней чехла ТВС, параллельных пластинам крепления твэлов к диффузору, образуются области с низкими аксиальными скоростями потока. Относительная аксиальная скорость в этих областях составляет 0.2–0.8 и зависит от степени их удаленности от дроссельной шайбы и диффузора.

2. Перекрытие проходного сечения шайбы без дополнительных отверстий приводит к существенному перераспределению поля аксиальной скорости потока в твэльном пучке из-за образования струйных течений из ее отверстий. Перераспределение поля скорости потока характеризуется наличием области с высокой аксиальной скоростью вокруг трубы центрального вытеснителя, относительные значения которой составляют 1.3—1.7 и зависят от степени удаленности этой области от дроссельной шайбы, диффузора и поглощающей решетки. Влияние конструкции дроссельной шайбы при полностью открытом проходном сечении на аксиальное течение теплоносителя в твэльном пучке минимально.

3. Перемешивание потока теплоносителя между соседними рядами твэлов периферийной области ТВС происходит с низкой интенсивностью и направлено преимущественно параллельно пластинам крепления твэлов к диффузору. Однако частичное перекрытие проходного сечения дроссельных шайб интенсифицирует процесс перемешивания, но только в пределах одного ряда твэлов, не ускоряя его между соседними рядами.

4. Из области центрального вытеснителя образуются поперечные потоки теплоносителя, направленные в периферийные области твэльного пучка TBC. Эти потоки фиксируются на всем протяжении пучка вплоть до первой дистанционирующей решетки. Частичное перекрытие проходного сечения дроссельных шайб интенсифицирует образование поперечных течений.

5. Выявленные неоднородности аксиальной скорости потока могут оказать существенное влияние на процессы возникновения и развития кризиса теплоотдачи в обширной области (по высоте и поперечному сечению) твэльного пучка. Неоднородности течения теплоносителя необходимо учитывать при обосновании теплотехнической надежности активных зон РУ новых атомных ледоколов и ACMM. Рекомендуется провести дополнительные конструкторские работы, направленные на поиск технических решений для обеспечения большей гомогенности поля аксиальной скорости теплоносителя на входе в твэльный пучок.

6. В дальнейшем целесообразно экспериментально исследовать глубину распространения неоднородности поля аксиальной скорости потока теплоносителя по длине твэльного пучка с использованием моделей, включающих удлиненные имитаторы твэлов и несколько макетов дистанционирующих решеток. Также необходимо поставить дополнительные опыты с целью оценить влияние новых элементов конструкции входного участка ТВС на гидродинамику теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- 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
- 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.
- 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 (848). С. 13–16.
- 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.
- Метод обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-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.
- 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. Вып. 4. С. 988–996.
- 8. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя на масштабной моде-

Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов // Теплоэнергетика.

9. Экспериментальные исследования гидродинамики

потока теплоносителя за листаниионирующей и

перемешивающей решетками TBCA-12PLUS ре-

актора ВВЭР-1000 / В.В. Андреев, С.М. Дмитри-

ев, А.А. Карпеш, А.Н. Пронин, А.Н. Терехин, А.Е. Хробостов // Междунар. журн. прикладных и

https://doi.org/10.1134/S004036361608004X

2016. № 8. C. 41-48.

ли кассетной ТВС реактора КЛТ-40С/С.М. Дмитриев, А.А. Баринов, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Часть 9. С. 1574—1578.

- Гухман А.А. Введение в теорию подобия. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1973.
- Особенности формирования потока на входе в топливную кассету реактора типа РИТМ АСММ / С.М. Дмитриев, Т.Д. Демкина, А.А. Добров, Д.В. Доронков, Д.С. Доронкова, Д.Д. Курицин, М.А. Легчанов, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов, Д.Н. Солнцев, Д.Л. Шипов // Атомная энергия. 2023. Т. 134. Вып. 1–2. С. 19–23.

Hydrodynamics of the Coolant at the Input to the FA Reactor of the RITM-Type Small Nuclear Power Plant

S. M. Dmitriev^a, T. D. Demkina^a, A. A. Dobrov^a, D. V. Doronkov^a, *, D. S. Doronkova^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—The results of an experimental study into the features of the process of coolant flow formation in the inlet section of the fuel assembly (FA) of the core of a RITM-type reactor of a small nuclear power plant (SNPP) are presented. The purpose of the work is to evaluate the influence of different design elements of the inlet section on the formation of coolant flow. To achieve this goal, a series of experiments was completed on a research aerodynamic stand with an air working environment using a large-scale experimental model, including structural elements of the FA inlet section from the throttle washer to the fuel rod assembly unit to the diffuser, as well as a fragment of the fuel rod bundle between the absorber and spacer grids. The studies were carried out using the pneumometric method and the method of injection of a contrast impurity in several sections along the length of the model. Measurements were made over the entire cross section of the model. Features of the coolant flow are visualized by cartograms of the axial flow velocity of the working medium and the distribution of impurities in the cross section of the model. The research results were used by specialists from the design and calculation departments of OKBM Afrikantov to substantiate engineering solutions when designing new cores of RITM reactors. The results of the experiments were collected in a database and used in the validation of the CFD program LOGOS, created by employees of the All-Russian Research Institute of Experimental Physics and the Institute for Theoretical and Mathematical Physics of Moscow State University as analogues of foreign programs of the same class, which include ANSYS, Star CCM, etc. Experimental data was also used when validating one-dimensional thermal-hydraulic codes used at OKBM Afrikantov in substantiating the thermal reliability of reactor cores. The thermohydraulic code CANAL is also included in this class of programs.

Keywords: fuel cassette, inlet section, throttle washer, ball lock, diffuser, fuel rod bundle, absorption and spacer grids, cover, central displacer, coolant hydrodynamics, axial velocity, contrast impurity