

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ВХОДНОГО УЧАСТКА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА РИТМ НА ГИДРОДИНАМИКУ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПУЧКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ¹

© 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, Д. Д. Курицин^а, Д. С. Николаев^а

^аНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, д. 24, г. Нижний Новгород, 603155 Россия

*e-mail: demkina.td@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2024 г.

После доработки 24.12.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

Приведены результаты экспериментального исследования гидродинамики теплоносителя на входе тепловыделяющей сборки активной зоны реактора РИТМ. Целью работы являлось определение влияния, оказываемого дроссельными шайбами и поглощающими решетками различной конструкции на формирование структуры потока теплоносителя в пучке твэлов тепловыделяющей сборки. Для достижения поставленной цели были проведены эксперименты на масштабной модели входного участка тепловыделяющей сборки со всеми элементами конструкции штатной сборки — от дроссельной шайбы до второй дистанционирующей решетки. Шаг между элементами модели был увеличен на масштабный коэффициент, который равнялся 5.8, относительно штатного шага их расположения. Для выполнения экспериментов использовали два метода исследования гидродинамики теплоносителя: пневмометрический и метод инъекции контрастной примеси. Исследования проводились в нескольких сечениях по длине модели, изучаемая область охватывала все ее поперечное сечение. Выбор мест расположения сечений измерений был обусловлен конструктивными особенностями модели. Были экспериментально определены коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) дроссельных шайб в полностью открытом и максимально перекрытом положениях. Особенности течения теплоносителя на входе тепловыделяющей сборки визуализированы с помощью картограмм аксиальной скорости в сечениях, а также картограмм распределения концентрации инжектируемой примеси. Выполнен сравнительный анализ эффективности применения поглощающих решеток двух видов. Результаты экспериментов использованы для обоснования конструкторских решений при изменении отдельных элементов тепловыделяющей сборки, а также для подтверждения надежности новых активных зон. Кроме того, полученные экспериментальные данные могут быть использованы для валидации отечественной CFD-программы ЛОГОС.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, входной участок, дроссельная шайба, поглощающая решетка, теплоноситель, гидродинамика, аксиальная скорость, контрастная примесь, коэффициент гидравлического сопротивления

DOI: 10.56304/S0040363625700894

Важной задачей развития Арктики является создание надежных автономных и маневренных энергоисточников, которые будут стабильно обеспечивать регион электроэнергией. Такими источниками энергии станут атомные станции малой мощности с реакторами РИТМ [1].

Реакторная установка РИТМ, созданная в ОКБМ им. И.И. Африкантова, изначально была

предназначена для применения на атомных ледоколах проекта 22220 [2], однако ее использование в проекте атомных станций малой мощности повлекло за собой необходимость провести ряд усовершенствований, связанных с особенностями эксплуатации станций, а также с изменениями требований нормативной базы [3, 4]. Усовершенствованию подверглась и активная зона реактора, а именно было применено топливо повышенной ураноемкости, увеличены количество тепловыделяющих сборок и длина твэльного пуч-

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

ка, что привело к изменению схемы гидравлического профилирования активной зоны. Для этого потребовалось провести комплекс работ по модернизации существующей элементной базы тепловыделяющих сборок, а также научные исследования, направленные на выбор оптимальной конструкции дроссельной шайбы и поглощающей решетки, кроме того, необходимо было определить глубину распространения их (шайбы и решетки) влияния на движение потока в твэльном пучке.

Настоящая работа является продолжением исследований гидродинамики теплоносителя на входе тепловыделяющей сборки реактора РИТМ, результаты которых представлены в [5, 6]. В этих работах рассмотрено влияние дроссельных шайб разной конструкции на структуру потока в модели входного участка тепловыделяющей сборки, фрагмент твэльного пучка которой был ограничен только первой дистанционирующей решеткой. Также в пучке твэлов была установлена поглощающая решетка².

В ходе проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ было принято решение об использовании поглощающей решетки как элемента, не только поглощающего локальный всплеск плотности потока нейтронов, но и позволяющего выровнять поле аксиальной скорости потока на входе в пучок твэлов.

В данной статье приведены результаты последних исследований гидродинамических характеристик потока, полученных на модели входного участка тепловыделяющей сборки с удлиненным до второй дистанционирующей решетки твэльным пучком при установке поглощающих решеток нескольких типов. Новая конструкция модели позволила оценить распространение входной неоднородности потока по длине твэльного пучка. Использование в ходе исследований поглощающих решеток нескольких типов обусловлено необходимостью выбора их оптимальной формы и размеров, обеспечивающих наибольшую однородность аксиальной скорости потока.

² Поглощающая решетка — это устройство, выполненное в виде цельнометаллического элемента с отверстиями под установку твэлов, стержней выгорающего поглотителя и центрального вытеснителя, предназначенное для поглощения локального всплеска плотности потока нейтронов в нижней части твэльного пучка, поскольку в данной области активной зоны теплоноситель имеет относительно низкую температуру. Поглощающие решетки не несут функции дистанционирования твэлов, данную роль выполняют пластинчатые дистанционирующие решетки, расположенные с определенным шагом по всей высоте твэльного пучка. Использование поглощающих решеток приводит к повышению гидравлического сопротивления тепловыделяющей сборки, однако применение таких решеток необходимо для обеспечения соответствующего уровня безопасности работы реакторной установки.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Моделирование течения водного теплоносителя на входе тепловыделяющей сборки осуществлялось на исследовательском стенде в НГТУ им. Р.Е. Алексеева [7–9]. Стенд представляет собой разомкнутый контур с системой нагнетания воздуха, которым производилась имитация течения водного теплоносителя, основанная на теории гидродинамического подобия [10].

Для проведения исследований была создана увеличенная модель фрагмента входного участка штатной тепловыделяющей сборки, которая представляла собой два канала круглого и шестигранного профиля, соединенных последовательно один за другим (рис. 1). В канале круглого профиля располагались дроссельная шайба и проточная часть шарикового замка, а в канале шестигранного профиля — диффузор, твэльный пучок, стержни выгорающего поглотителя, поглощающая и дистанционирующие решетки, а также центральный вытеснитель. Крепление элементов между собой осуществлялось с помощью дистанционирующих решеток и шести уголков жесткости. Все элементы модели, а также шаг их расположения были увеличены относительно штатной конструкции тепловыделяющей сборки на коэффициент геометрического подобия 5.8.

В ходе экспериментов определялось влияние на поток дроссельных шайб и поглощающих решеток двух типов. Каждая дроссельная шайба (рис. 2) состояла из двух дисков с отверстиями, установленных на центральной втулке. Регулирование коэффициента гидравлического сопротивления шайб осуществлялось путем поворота одного из дисков. Шайбы различались количеством отверстий для прохода сквозь них потока [шайба без дополнительных отверстий (см. рис. 2, а, б), шайба с дополнительными отверстиями (см. рис. 2, в, г)]. Наличие дополнительных отверстий приводит к изменению площади проходного сечения шайбы и, как следствие, к расширению диапазона регулирования ее коэффициента гидравлического сопротивления (КГС). Выбор дроссельной шайбы с дополнительными отверстиями был обусловлен, главным образом, необходимостью такого расширения КГС с возможностью его плавного изменения.

Поглощающие решетки (рис. 3) имели одинаковую суммарную площадь поперечного сечения, однако при этом по-разному затесняли центральную и периферийную области твэльного пучка. На рис. 4 показано их наложение с цветовым выделением перераспределяемой площади.

На первом этапе экспериментальных исследований определялись коэффициенты гидравличе-

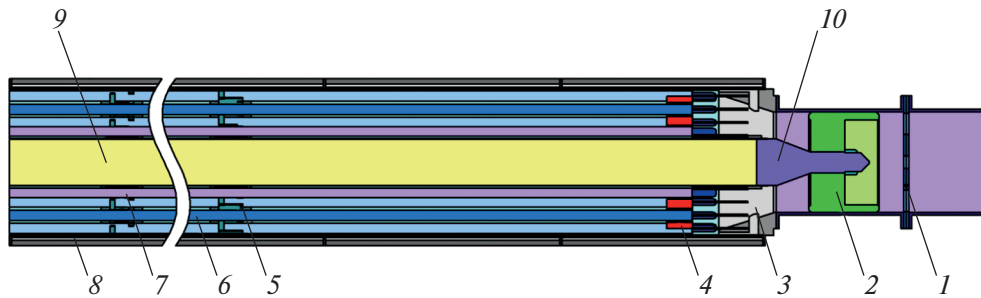


Рис. 1. Экспериментальная модель.

1 – дроссельная шайба; 2 – шариковый замок; 3 – диффузор; 4 – поглощающая решетка; 5 – дистанционирующая решетка; 6 – тепловыделяющий элемент; 7 – стержень выгорающего поглотителя; 8 – уголок жесткости; 9 – центральный вытеснитель; 10 – обтекатель

ского сопротивления дроссельных шайб. Эксперименты выполнялись в открытом и максимально перекрытом положениях шайб. Максимальный поворот диска каждой шайбы составлял 15° , что соответствует предельно возможному затеснению проходного сечения.

Поскольку поглощающие решетки имели равные площади поперечного сечения и создавали одинаковое гидравлическое сопротивление, КГС каждой дроссельной шайбы в открытом и максимально перекрытом положениях определялся при установке в модель поглощающей решетки с затеснением периферийной области по методике, основанной на измерении статического давления в сечении перед дроссельной шайбой в двух вариантах – с установленной в модель шайбой, а затем без нее.

Исследование особенностей гидродинамики теплоносителя проводилось пневмометрическим методом и методом инъекции контрастной примеси.

Для реализации пневмометрического метода использовали трубки Пито, предварительно тарированные в потоке воздуха, и дифференциальный манометр, с помощью которых получали значения аксиальной скорости потока. Измерения скорости производили в семи сечениях модели (на расстоянии $L/d_r = 1.2; 9.6; 24.2; 38.8; 52.6; 70.2$ и 87.7 от входа в твэльный пучок, где L – продольная координата, d_r – гидравлический диаметр твэльного пучка). Расположение сечений показано на рис. 5. Погрешность определения аксиальной скорости не превышала 7%.

Метод инъекции контрастной примеси заключается в том, что в поток, протекающий через модель, через несколько ячеек вводится контрастная примесь. В настоящем исследовании в качестве примеси использовался пропан, имеющий близкие с воздухом теплофизические свойства. Примесь вводили в сечении, расположенном в области крепления твэлов к диффузору, с

помощью специальных насадок-распылителей, которые необходимы для рассеяния вводимой струи контрастной примеси. Концентрация примеси измерялась на таком расстоянии от точки ее инъекции, на котором искажение профиля ее концентрации на начальном участке уже не оказывало влияния на получаемые результаты. Минимальное расстояние от решетки до сечения, в котором выполнялись измерения концентрации пропана, было определено на основе данных проведенного ранее эксперимента. Этот эксперимент состоял в том, что в центр конкретной ячейки, находящейся перед дистанционирующей

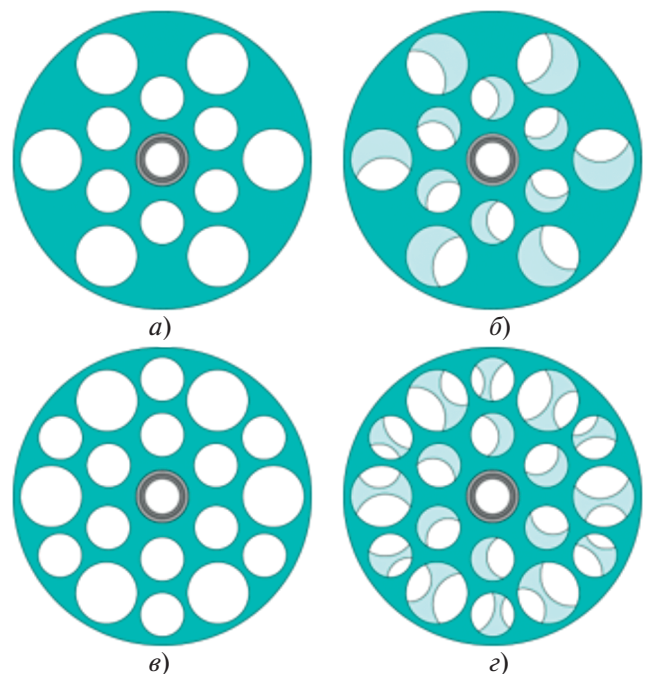


Рис. 2. Дроссельные шайбы без дополнительных отверстий (а, б) и с дополнительными отверстиями (в, г). Положение шайбы: а, в – открытое; б, г – максимально перекрытое

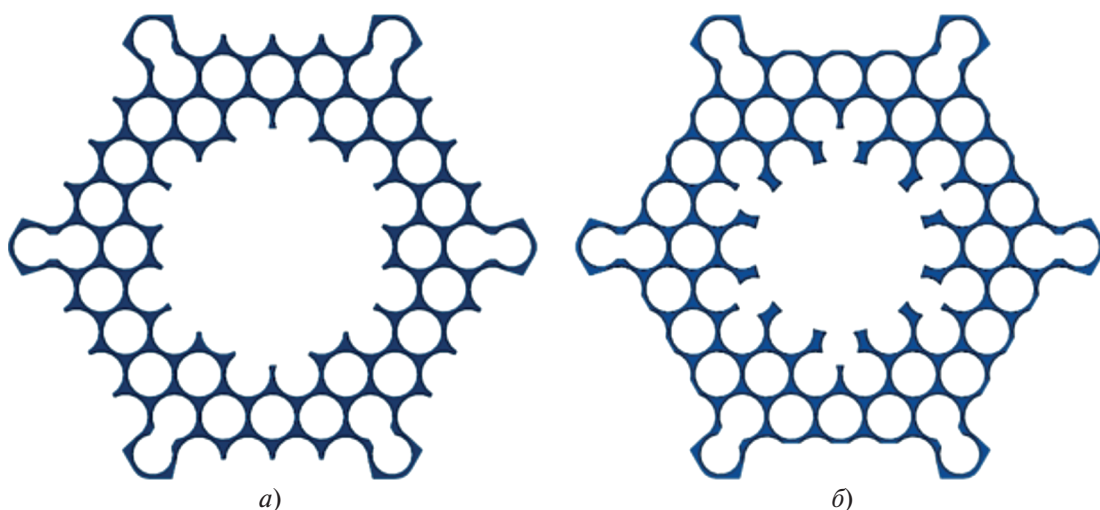


Рис. 3. Поглощающие решетки с затеснением периферийной (а) и центральной (б) областей

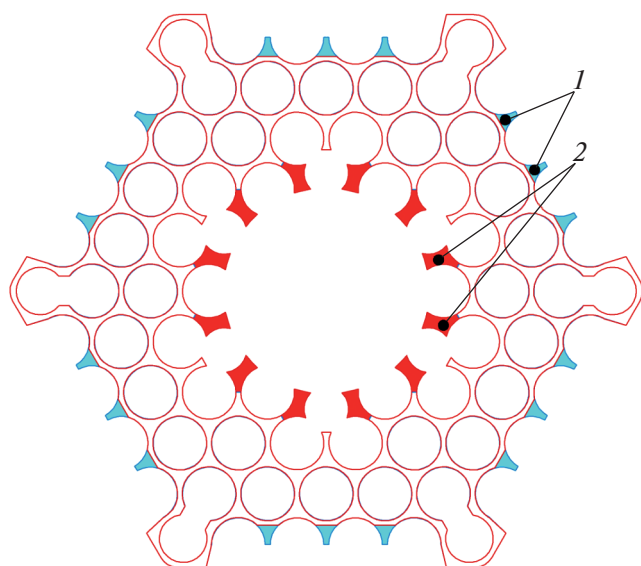


Рис. 4. Наложение поперечных сечений поглощающих решеток с затеснением периферийной (1) и центральной (2) областей

щей решеткой, подавался пропан, а затем измерялась концентрация примеси за решеткой.

Данный эксперимент проводился до тех пор, пока примесь (пропан) при отдалении сечения впрыска от решетки не начинала растекаться в соседние ячейки. При этом учитывалось, что первое сечение, в котором измерялась концентрация примеси, находилось в модели входного участка тепловыделяющей сборки на расстоянии, в несколько раз превышающем минимальное расстояние, полученное в ходе поверочного эксперимента. Концентрация примеси измерялась газоанализатором в сечениях за поглощающей решеткой. Погрешность измерения не превышала 0.25%. Расположение ячеек подачи примеси показано на рис. 6.

Результаты эксперимента визуализировались в виде картограмм безразмерной аксиальной скорости потока в сечениях измерения и распределения концентрации примеси.

Безразмерная аксиальная скорость потока была получена в результате нормирования значений

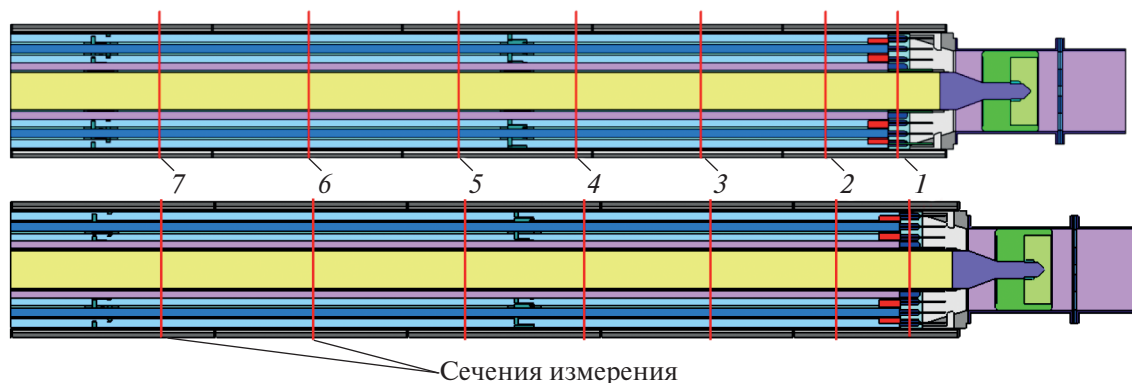


Рис. 5. Расположение сечений измерения аксиальной скорости.
 L/d_f : 1 – 1.2; 2 – 9.6; 3 – 24.2; 4 – 38.8; 5 – 52.6; 6 – 70.2; 7 – 87.7

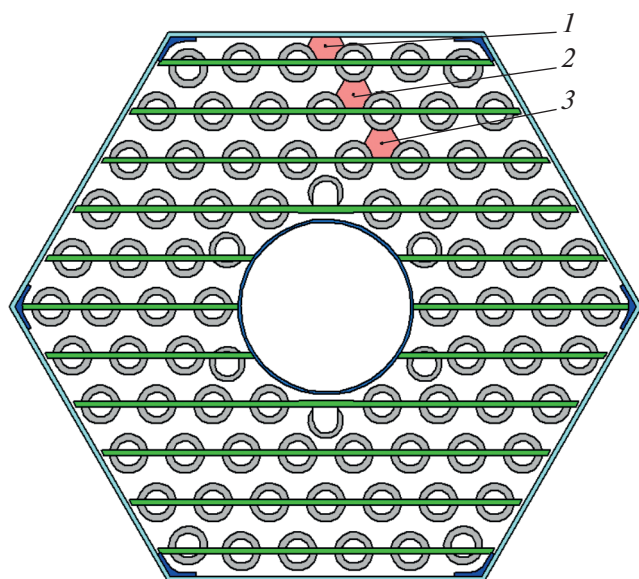


Рис. 6. Расположение ячеек инжекции контрастной примеси в поперечном сечении модели. Область подачи примеси в ряду твэлов от чехла: 1 – первом; 2 – втором; 3 – третьем

скорости, определенных в точках измерения w_z , на среднерасходную скорость потока на входе модели $w_{ср}$.

Среднерасходная скорость измерялась расходомерным коллектором с известным сопротивлением, а также с помощью трубок Пито по методике, описанной в [11]. В зависимости от типа используемой шайбы и положения ее дисков значения среднерасходной скорости потока воздуха на входе модели находились в диапазоне 12.0–27.8 м/с. При этом критерий Рейнольдса (Re) варьировался от 31 000 до 71 000, что соответствует зоне автомодельного течения воздуха, которая наступает при числе $Re = 25000–30000$. Более подробное обоснование представительности проведенных исследований приведено в работе [5]. Поскольку эксперименты выполнялись в зоне автомодельности, полученные данные могут быть использованы для анализа гидродинамики водного теплоносителя в штатной тепловыделяющей сборке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментально получены следующие значения коэффициента гидравлического сопротивления дроссельных шайб двух типов:

Дроссельная шайба без дополнительных отверстий:

в полностью открытом положении 8.9
в максимально перекрытом положении 49.9

Дроссельная шайба с дополнительными отверстиями:

в полностью открытом положении 2.5
в максимально перекрытом положении 9.9

Диапазон регулирования КГС дроссельной шайбы без дополнительных отверстий в 18 раз превышает диапазон, который дает шайба с дополнительными отверстиями. Однако последняя в полностью открытом положении обеспечивает значение коэффициента гидравлического сопротивления на 6.4 ед. более низкое, чем дроссельная шайба без дополнительных отверстий в открытом положении, что может быть важно при гидропрофилировании активной зоны.

Исследования гидродинамики теплоносителя пневмометрическим методом в модели тепловыделяющей сборки при установке в нее поглощающей решетки с затеснением периферийной области позволили выявить следующие особенности течения.

1. В области крепления твэлов к диффузору ($L/d_r = 1.2$) при установке дроссельных шайб обоих типов в открытом положении распределения аксиальной скорости потока имеют схожий вид (рис. 7). Минимальная безразмерная аксиальная скорость потока локализована у чехла модели (в пределах двух рядов твэлов у граней чехла, параллельных пластинам крепления твэлов и в пределах одного ряда у остальных граней чехла) и составила 0.05–0.60 в области уголков жесткости и 0.3–0.8 по середине граней. Такое расположение области низкой скорости потока может быть вызвано совместным влиянием конструктивных элементов входного участка от дроссельной шайбы до поглощающей решетки. Расширение области низкой скорости у граней чехла, параллельных пластинам крепления твэлов, могло возникнуть из-за конфигурации самих пластин крепления и диффузора, которые затесняют проходное сечение таким образом, что перетекание теплоносителя в периферийные ячейки практически отсутствует. В области уголков жесткости на аксиальную скорость дополнительное влияние может оказывать замедление потока теплоносителя перед поглощающей решеткой, значительно затесняющей проходное сечение в угловой зоне.

Область высокой аксиальной скорости потока расположена в центральной части поперечного сечения, где безразмерная скорость составляет 1.4–1.8. Ее локализация может быть обусловлена возникновением за отверстиями шайб высокоскоростных струй потока. Перекрывание проходного сечения дроссельной шайбы

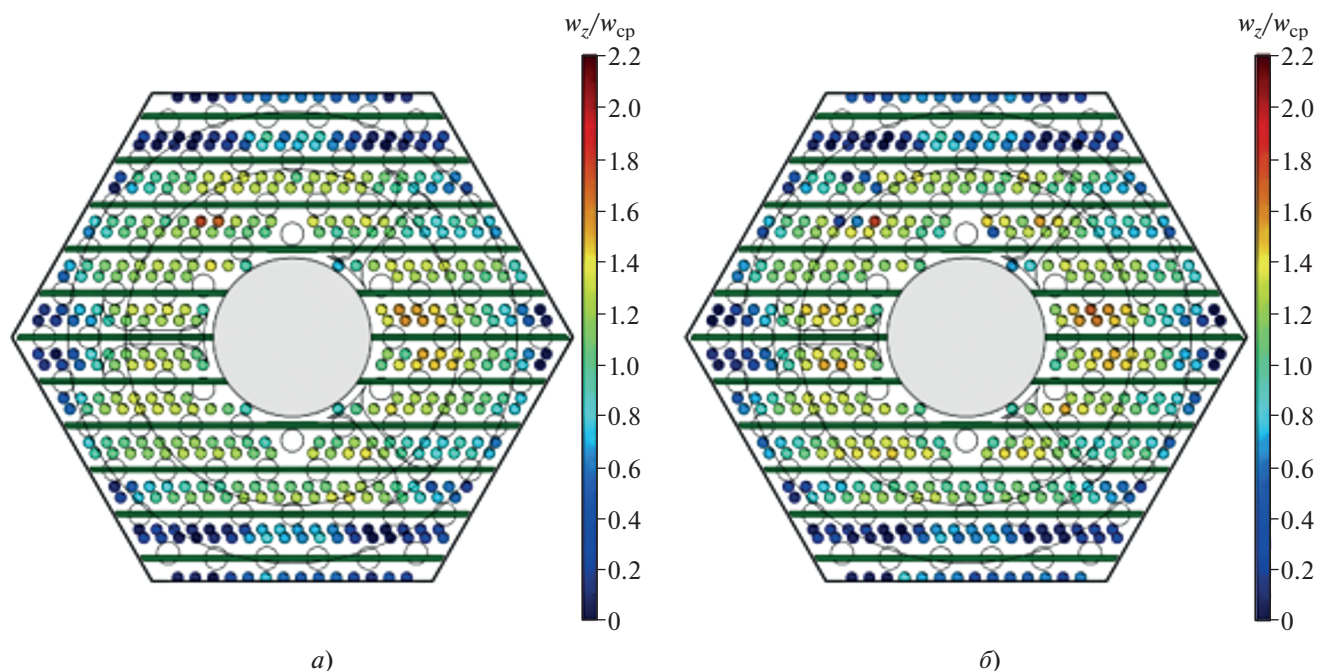


Рис. 7. Аксиальная скорость потока w_z/w_{cp} в области крепления твэлов за дроссельными шайбами без дополнительных отверстий (а) и с дополнительными отверстиями в открытом положении (б) при установке поглощающей решетки с затеснением периферийной области

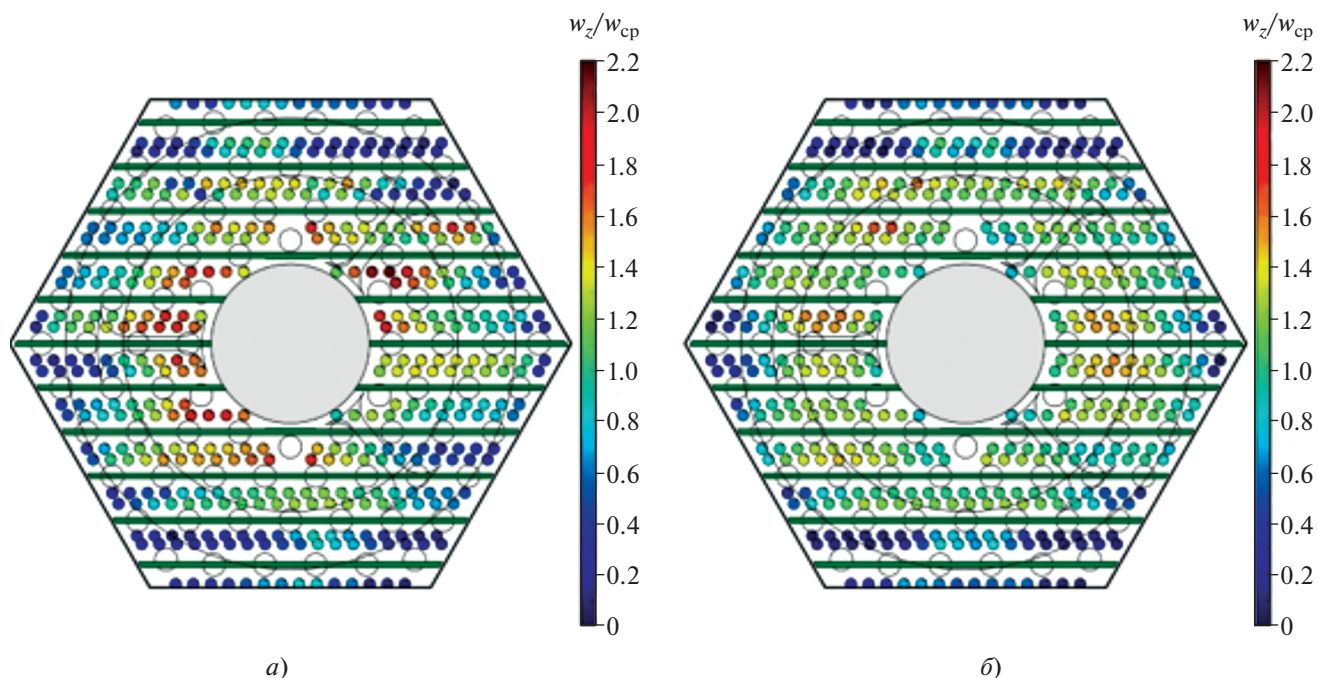


Рис. 8. Аксиальная скорость потока w_z/w_{cp} в области крепления твэлов за дроссельными шайбами без дополнительных отверстий (а) и с дополнительными отверстиями в максимально перекрытом положении (б) при установке поглощающей решетки с затеснением периферийной области

с дополнительными отверстиями не привело к значительному изменению распределения аксиальной скорости, лишь по центрам граней скорость выросла с 0.3–0.8 до 0.7–1.0 (рис. 8).

При установке дроссельной шайбы без дополнительных отверстий в максимально перекрытом положении картина распределения скорости претерпела существенные изменения (см. рис. 8, а).

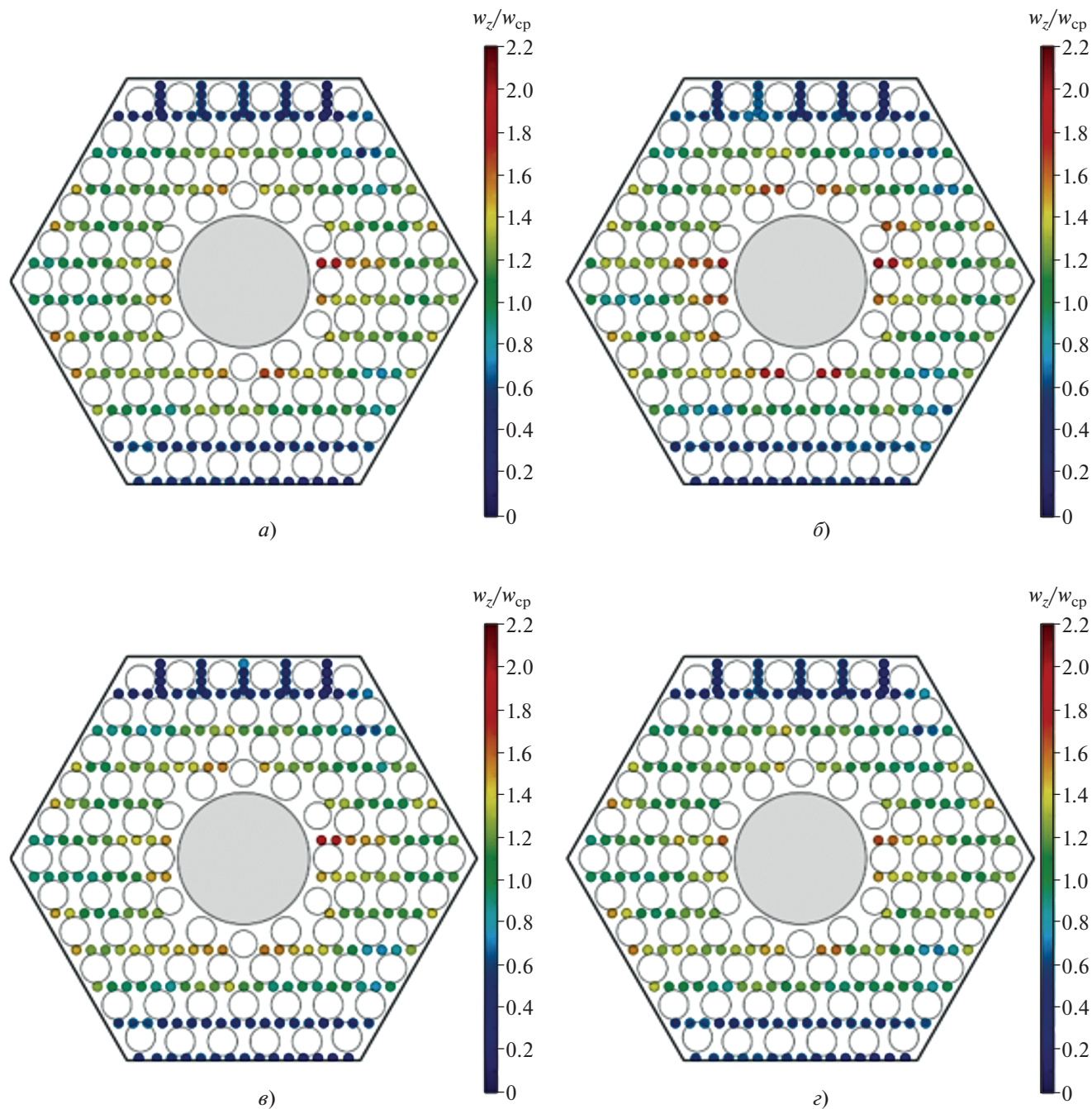


Рис. 9. Аксиальная скорость потока w_z/w_{cp} за поглощающей решеткой с затеснением периферийной области при использовании шайб без дополнительных отверстий (*а, б*) и с дополнительными отверстиями (*в, з*). Положение шайбы: *а, в* — открытое; *б, з* — максимально перекрытое

Границы областей низкой и высокой скоростей расширились — локально в области центрального вытеснителя значение аксиальной скорости в 2.2 раза превысило среднерасходную скорость. Это могло быть вызвано усилением струй с высокой аксиальной скоростью, образующихся за отверстиями шайбы из-за их частичного перекрытия.

2. За поглощающей решеткой ($L/d_r = 9.6$) с затеснением периферийной области при установке шайб обоих типов в открытом положении характерно сохранение области низкой аксиальной скорости у граней чехла, параллельных пластинам крепления твэлов, где скорость составила 0.1–0.6 (рис. 9, *а, в*). При перекрытии проходного

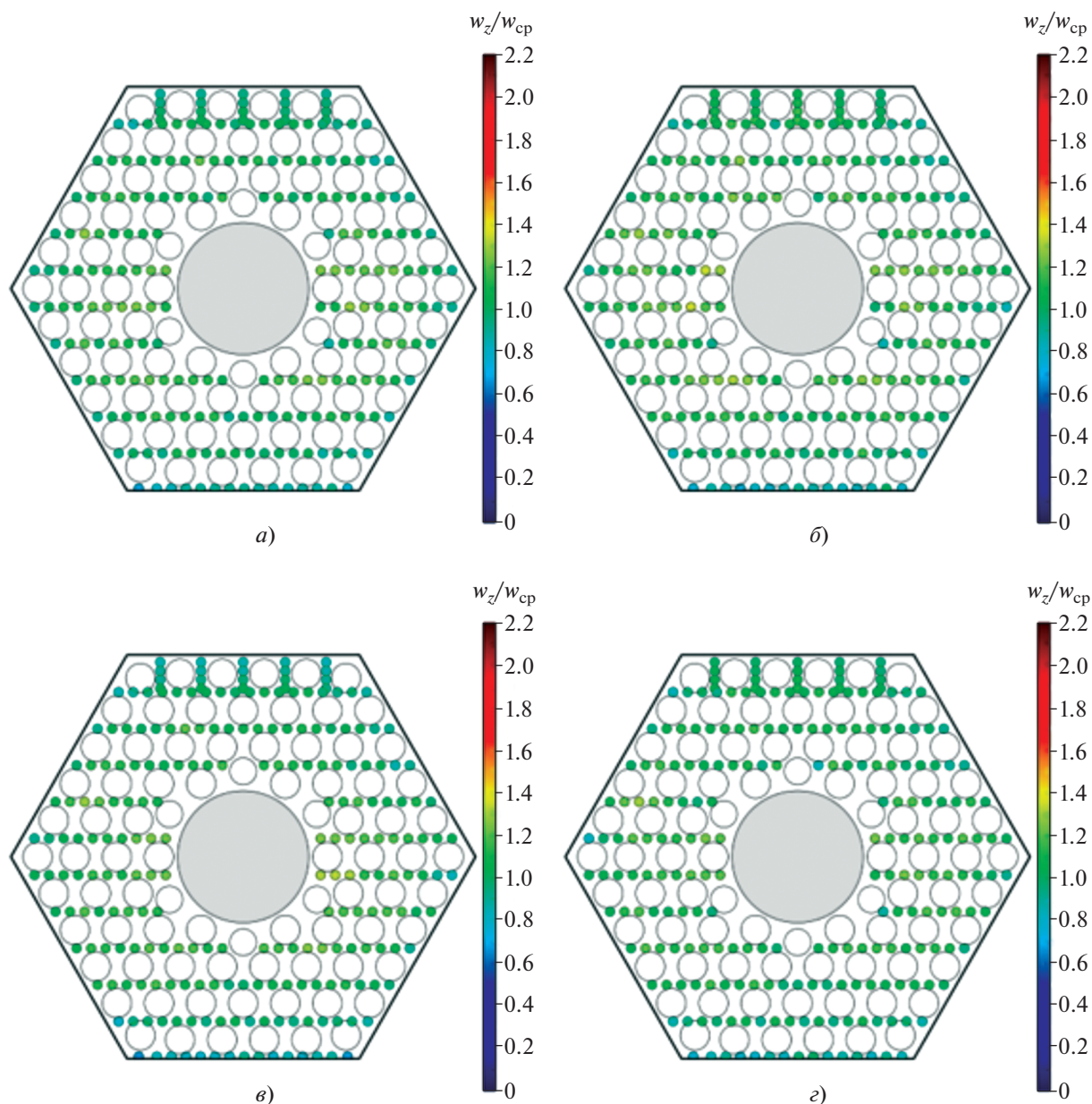


Рис. 10. Аксиальная скорость потока w_z/w_{cp} за поглощающей решеткой с затеснением периферийной области по середине пролета между дистанционирующими решетками (а, в, г) и перед второй дистанционирующей решеткой (б) при использовании шайб без дополнительных отверстий (а, б) и с дополнительными отверстиями (в, г). Остальные обозначения см. рис. 9

сечения шайбы без дополнительных отверстий наблюдалось локальное возрастание безразмерной аксиальной скорости потока в центральной части поперечного сечения (рис. 9, б). Также отмечалась асимметрия распределений аксиальной скорости вне зависимости от типа установленной шайбы, степени ее перекрытия, что может быть обусловлено сохранением влияния конфигурации пластин крепления твэлов к диффузору, препятствующих перетеканию потока в направлении перпендикулярном данным пластинам.

3. При удалении от поглощающей решетки в глубь твэльного пучка происходило постепенное выравнивание аксиальной скорости потока по сечению. Влияние конструктивных элементов входного участка уже практически отсутствовало в сечении, расположенном по середине пролета пучка твэлов между первой и второй дистанционирующими решетками ($L/d_r = 70.2$). Такая особенность течения возможна при установке в сборку дроссельной шайбы с дополнительными отверстиями вне зависимости от степени перекрытия ее

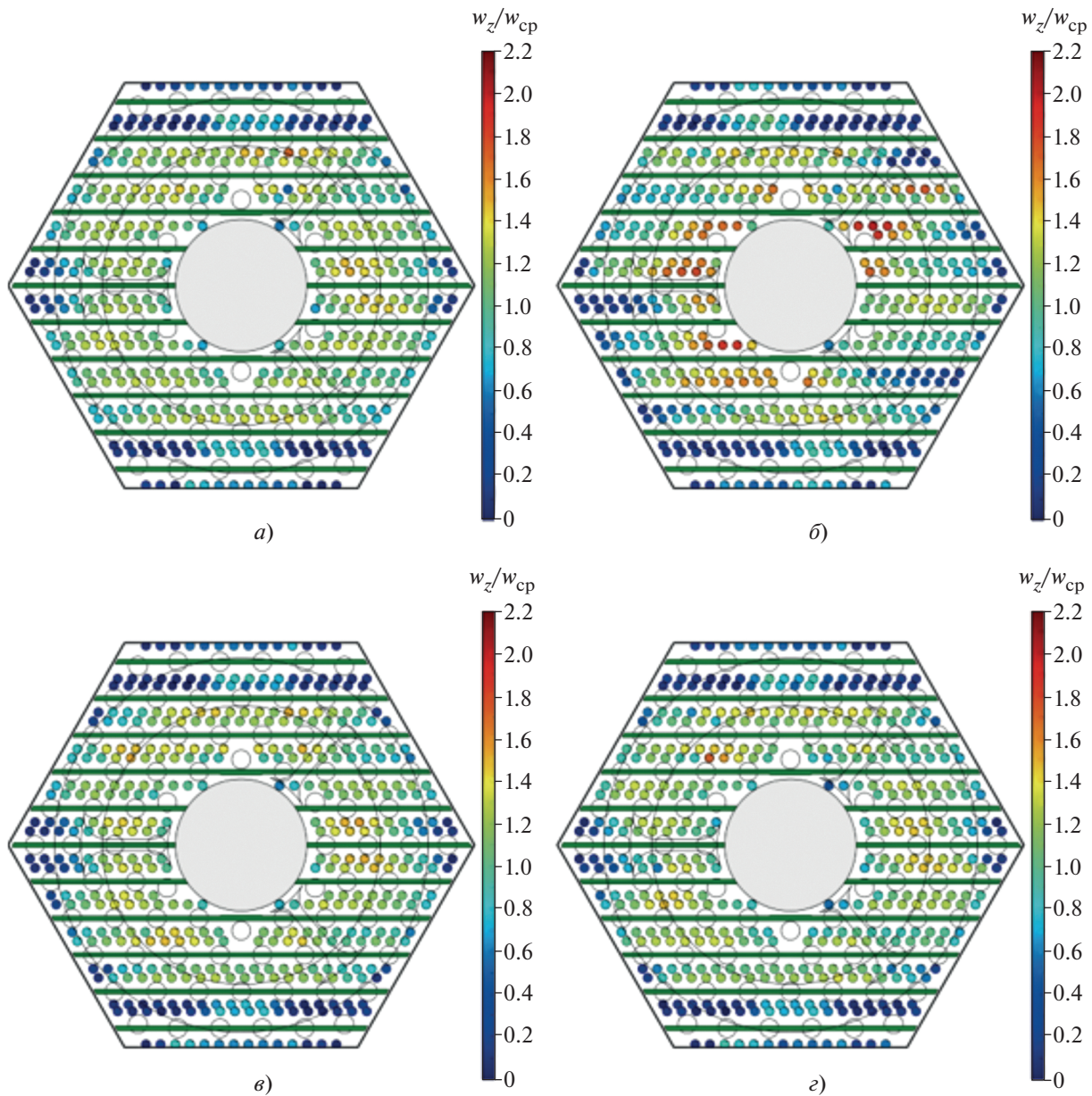


Рис. 11. Аксиальная скорость потока w_z/w_{cp} в области крепления твэлов при установке поглощающей решетки с затеснением центральной области при использовании шайб без дополнительных отверстий (а, б) и с дополнительными отверстиями (в, г).

Остальные обозначения см. рис. 9

проходного сечения, а также при установке шайбы без дополнительных отверстий с полностью открытым проходным сечением (рис. 10, а, в, г). Во всех указанных случаях наблюдалось наличие областей с низкой аксиальной скоростью потока у поверхностей чехла и центрального вытеснителя (0.5–0.8), что могло произойти из-за торможения потока при соприкосновении с этими поверхностями. При перекрытии проходного сечения шайбы без дополнительных отверстий выравнивание безразмерной аксиальной скорости потока про-

исходило лишь перед второй дистанционирующей решеткой ($L/d_r = 87.7$) (рис. 10, б).

При проведении экспериментальных исследований гидродинамики теплоносителя пневмометрическим методом в модели с установленной поглощающей решеткой с затеснением центральной области были получены следующие результаты.

1. В сечении, расположенном в месте крепления твэлов к диффузору ($L/d_r = 1.2$), при установке шайбы без дополнительных отверстий в открытом

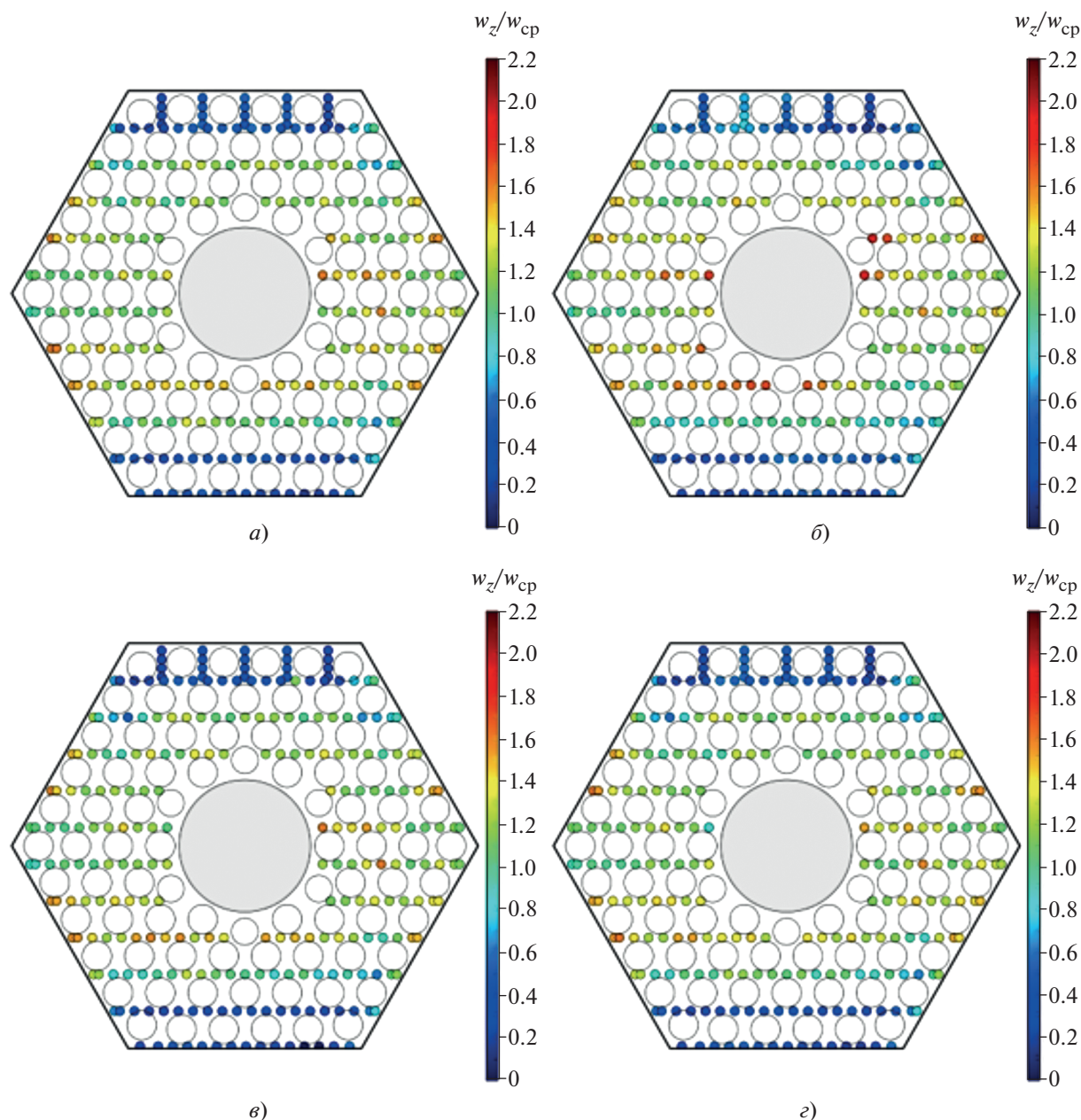


Рис. 12. Аксиальная скорость потока w_z/w_{cp} за поглощающей решеткой с затеснением центральной области при использовании шайб без дополнительных отверстий (а, б) и с дополнительными отверстиями (в, г). Остальные обозначения см. рис. 9

положении и шайбы с дополнительными отверстиями вне зависимости от степени перекрытия ее проходного сечения изменилась локализация области низкой аксиальной скорости потока, которая теперь находилась у углов жесткости, так как по центрам граней безразмерная аксиальная скорость выросла с 0.05–0.60 до 0.50–1.00 (рис. 11). При установке в модель шайбы без дополнительных отверстий в максимально перекрытом положении изменения в распределении аксиальной скорости отсутствовали.

2. За поглощающей решеткой с затеснением центральной области ($L/d_r = 9.6$) независимо от типа установленной дроссельной шайбы и степени ее перекрытия наблюдалось увеличение аксиальной скорости потока на периферии твэльного пучка, за исключением области углов жесткости, где она достигала 17% (рис. 12). В области центрального вытеснителя в локальных максимумах аксиальной скорости наблюдалось снижение скорости потока по сравнению с этим показателем при установке в модель поглощающей решет-

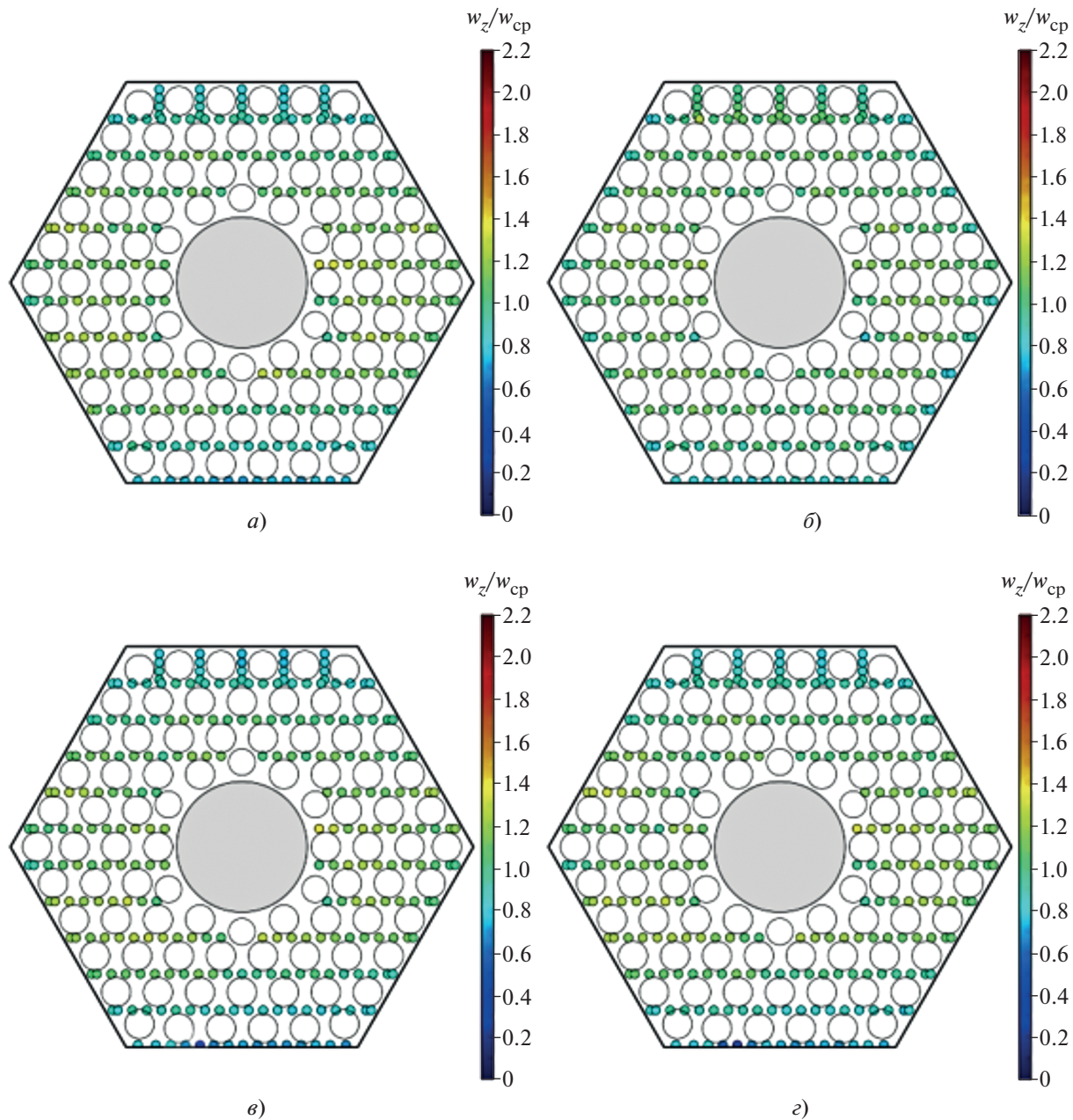


Рис. 13. Аксиальная скорость потока w_z/w_{cp} за поглощающей решеткой с затеснением центральной области перед первой дистанционирующей решеткой (а, в, з) и по середине пролета между дистанционирующими решетками (б) при использовании шайб без дополнительных отверстий (а, б) и с дополнительными отверстиями (в, з). Остальные обозначения см. рис. 9

ки с затеснением периферийной области. При размещении шайб с открытым проходным сечением максимальная аксиальная скорость снижалась на 20%, а при перекрытии проходного сечения шайб – на 10%. Отмечалось сохранение асимметрии распределений аксиальной скорости, на которую установка поглощающей решетки другой конструкции почти никак не повлияла.

3. Конструкция входного участка тепловыделяющей сборки по мере удаления от поглощающей решетки с затеснением центральной области практически не оказывала воздействия на распределение аксиальной скорости к сечению, расположенному по середине пролета между дистанционирующими решетками ($L/d_r = 70.2$), при установке шайбы без дополнительных отверстий с перекрытым сечением (рис. 13). В

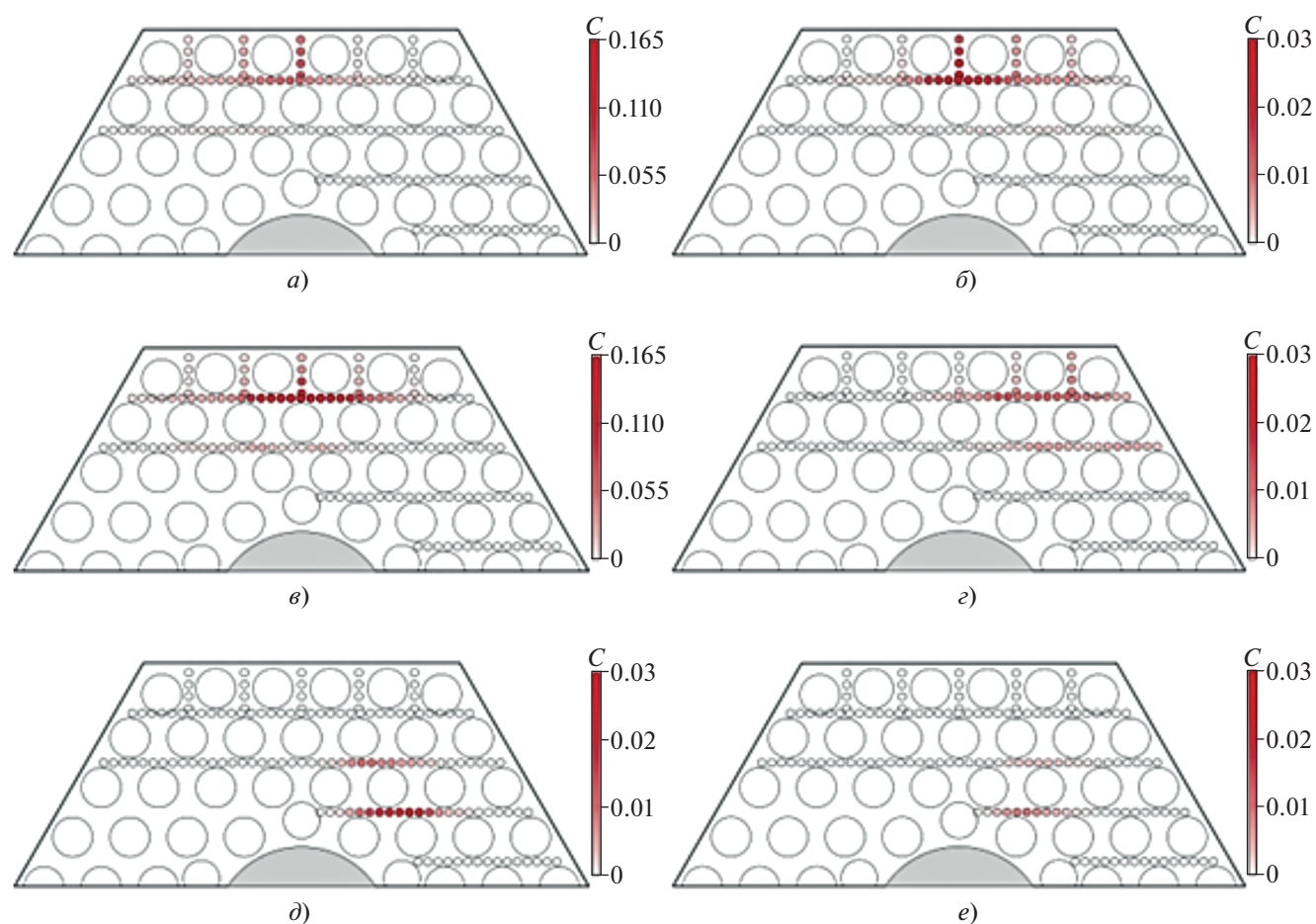


Рис. 14. Распределение относительной концентрации примеси C за поглощающей решеткой с затеснением в центральной области с дроссельной шайбой в максимально перекрытом положении без дополнительных отверстий (a, v, d) и с дополнительными отверстиями (b, z, e). Область подачи примеси в ряду твэлов от чехла: a, b – первом; v, z – втором; d, e – третьем

остальных случаях влияние элементов (шайбы, диффузора и поглощающей решетки) нивелировалось уже перед первой дистанционирующей решеткой ($L/d_r = 38.8$).

В процессе экспериментальных исследований в модели с установленной поглощающей решеткой с затеснением центральной области, выполненных методом инъекции контрастной примеси, были выявлены следующие особенности распределения примеси.

1. За поглощающей решеткой с затеснением центральной области ($L/d_r = 9.6$) независимо от типа устанавливаемой шайбы максимальная концентрация примеси наблюдалась в области подачи, растекание примеси происходило в горизонтальном направлении в обе стороны от нее с незначительным перетеканием в соседние горизонтальные ряды ячеек (рис. 14) вследствие низкой интенсивности перемешивания потока теплоносителя.

2. Процесс поперечного перетекания теплоносителя при установке шайбы с дополнительными отверстиями в открытом положении был более интенсивным, чем при использовании шайбы без дополнительных отверстий. Выравнивание по сечению относительной концентрации до 0.04 независимо от области инъекции контрастной примеси при установке дроссельной шайбы с дополнительными отверстиями в открытом положении происходило в сечении, расположенном перед первой дистанционирующей решеткой ($L/d_r = 38.8$). За шайбой без дополнительных отверстий при подаче примеси в ячейки первого и второго рядов твэлов от грани чехла, параллельной пластинам крепления твэлов к диффузору, выравнивание относительной концентрации наблюдалось за первой дистанционирующей решеткой ($L/d_r = 52.6$). При подаче примеси в ячейку третьего ряда твэлов выравнивание концентрации наступало перед второй дистанционирующей решеткой ($L/d_r = 87.7$).

3. Перекрытие проходного сечения шайб не оказывало влияния на интенсивность процесса поперечного перетекания теплоносителя. Это характерно для всех зон подачи примеси.

ВЫВОДЫ

1. Независимо от типа дроссельной шайбы и места ее установки применение поглощающей решетки с затеснением центральной области приводит к интенсификации процесса выравнивания аксиальной скорости потока в поперечном сечении твэльного пучка по сравнению с использованием поглощающей решетки с затеснением периферийной области. При размещении шайбы без дополнительных отверстий в перекрытом положении влияние конструкции входного участка нивелируется на 17.5 калибра раньше, а при иных вариантах установки дроссельных шайб – не ранее 31.4 калибра по сравнению с установкой поглощающей решетки с затеснением периферийной области.

2. Диапазон регулирования коэффициента гидравлического сопротивления дроссельной шайбы без дополнительных отверстий более широкий (8.9–49.9), чем у шайбы с дополнительными отверстиями, однако в открытом положении у такой шайбы коэффициент гидравлического сопротивления становится существенно ниже (2.5), чем у шайбы без дополнительных отверстий.

3. При проектировании новых активных зон рекомендуется использовать дроссельные шайбы обеих конструкций, т.е. в самые энергонапряженные ТВС устанавливать шайбы с дополнительными отверстиями, а в остальные сборки – шайбы без дополнительных отверстий.

4. Применение поглощающей решетки с затеснением центральной области позволит ускорить процесс выравнивания аксиальной скорости потока по сечению твэльного пучка.

5. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы не только для оптимизации схемы гидравлического профилирования новых активных зон атомных станций малой мощности и обоснования их безопасности, но и в качестве базы опытных данных для валидации отечественной CFD-программы ЛОГОС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анализ** опыта эксплуатации активных зон атомных ледоколов первого поколения. База данных в обоснование и развитие новых атомных ледоколов и плавучих энергоблоков / О.Б. Самойлов, А.И. Романов, В.Ю. Галицких, А.А. Захарычев, О.А. Морозов, А.В. Митрофанов, В.Ю. Силаев // Технологии

обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2023. Вып. 3 (33). С. 16–24.

2. **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.
3. **Научно-технические** аспекты создания инновационной реакторной установки РИТМ-200Н для АСММ / В.В. Петрунин, Н.В. Шешина, С.А. Фатеев, А.В. Кураченков, Д.В. Щекин, С.М. Брыкалов, А.А. Безруков // Атомная энергия. 2023. Т. 134. Вып. 1–2. С. 3–10.
4. **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.
5. **Гидродинамика** теплоносителя на входе в ТВС реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности / С.М. Дмитриев, Т.Д. Демкина, А.А. Добров, Д.В. Доронков, Д.С. Доронкова, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов // Теплоэнергетика. 2024. № 5. С. 5–21. <https://doi.org/10.56304/S0040363624050059>
6. **Исследование** особенностей течения теплоносителя на входе в ТВС реактора РИТМ атомного ледокола / С.М. Дмитриев, Т.Д. Демкина, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов // Атомная энергия. 2024. Т. 136. Вып. 3–4. С. 113–117.
7. **Экспериментальные** исследования локальной гидродинамики теплоносителя на масштабной модели кассетной ТВС реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев, А.А. Баринев, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 41–48. <https://doi.org/10.1134/S004036361608004X>
8. **Гидродинамика** теплоносителя в выходном участке тепловыделяющей сборки кассетного типа / С.М. Дмитриев, Т.Д. Демкина, А.А. Добров, Д.В. Доронков, Д.С. Доронкова, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов // ИФЖ. 2024. Т. 97. № 1. С. 198–206.
9. **Экспериментальное** определение гидродинамических характеристик потока теплоносителя на выходе из ТВС реактора РИТМ атомного ледокола / С.М. Дмитриев, Т.Д. Демкина, А.А. Добров, Д.В. Доронков, Д.С. Доронкова, Д.Д. Курицин, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов // Атомная энергия. 2024. Т. 136. Вып. 1–2. С. 45–49.
10. **Гухман А.А.** Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973.
11. **ГОСТ 12.3.018-79.** Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. Введ. в действие 05.09.1979. Переизд. 03.2001. М.: Изд-во стандартов, 2001.

Investigation into the Effect of Structural Elements of the Entrance Section of a Fuel Assembly in the RITM Reactor on the Coolant Hydrodynamics in a Fuel-Rod Bundle

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

^a *Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603155 Russia*

^{*}*e-mail: demkina.td@mail.ru*

Abstract—The results of experimental investigation into the coolant hydrodynamics within the entrance section of a fuel assembly in the core of the RITM reactor are presented. The investigation was aimed at capturing the effect of orifices and absorber grids of various designs on the development of the coolant flow in a fuel-rod bundle of a fuel assembly. To attain this goal, the experiments were performed in a scale model of the entrance section of the fuel assembly with all the structural elements of the standard assembly — from the throttle orifice to the second spacer grid. The spacing between model elements was increased by a scale factor equal to 5.8 relative to the standard spacing of their arrangement. The experiments were performed using two methods for investigating the coolant hydrodynamics: the pneumometric method and the tracer injection method. The studies were carried out at several cross-sections along the length of the model, and the studied region covered the entire cross-section of the model. The measurement sections were located considering the design features of the model. The hydraulic resistance coefficients (HRCs) of throttle orifices in fully open and maximally closed positions were experimentally determined. The features of the coolant flow at the inlet of the fuel assembly are visualized using maps of axial velocity distribution in the measurement sections as well as maps of injected tracer concentration distribution. A comparative analysis of the efficiency of application of two types of absorber grids was carried out. The experimental results were used to substantiate design solutions in modifying individual elements of the fuel assembly, as well as to confirm the reliability of new cores. In addition, the obtained experimental data can be used to validate the LOGOS CFD code developed in Russia.

Keywords: fuel assembly, entrance section, throttling orifice, absorber grid, coolant, hydrodynamics, axial velocity, tracer, hydraulic resistance coefficient