

УДК 621.039

Особенности формирования потока теплоносителя во входном участке топливной кассеты реактора типа «РИТМ» атомной станции малой мощности*

**С.М. Дмитриев, Т.Д. Демкина, А.А. Добров, Д.В. Доронков,
Д.С. Доронкова, М.А. Легчанов, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов,
Д.Н. Солнцев**

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород*

E-mail: nevid000@mail.ru

Представлены результаты экспериментального изучения особенностей формирования потока теплоносителя во входном участке тепловыделяющих сборок кассетной активной зоны реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности. Целью работы является исследование влияния разных элементов конструкции входного участка на перераспределение аксиальной скорости потока теплоносителя. Для достижения цели проведена серия экспериментов на масштабной экспериментальной модели, включающей элементы конструкции входного участка от тарировочной шайбы до узла крепления ТВЭЛов к диффузору, а также пролет ТВЭЛЬНОГО пучка между поглощающей решеткой и первой дистанционирующей решеткой. Исследования проводились с использованием пневмометрического метода в нескольких характерных сечениях по длине модели. Расположение точек измерения охватывает все поперечное сечение модели. Особенности течения теплоносителя визуализированы картограммами аксиальной скорости потока рабочей среды, а также графиками аксиальной скорости по сечению пучка ТВЭЛов. Результаты экспериментального моделирования использованы при оптимизации гидравлического профилирования элементов конструкции входного участка тепловыделяющих сборок. Полученная база опытных данных может применяться для валидации отечественной CFD-программы «ЛОГОС», а также для уточнения методик теплогидравлического расчета активных зон в попятном приближении.

Ключевые слова: топливная кассета, дроссельная шайба, входной участок, твэльный пучок, поглощающая решетка, дистанционирующая решетка, чехол топливной кассеты, центральный вытеснитель, гидродинамика теплоносителя, аксиальная скорость, контрастная примесь, поток.

Введение

Важное место в развитии Российской Федерации занимает освоение ресурсов Арктики, значительная концентрация которых обусловила строительство промышленных предприятий в Арктическом регионе. Для развития этого региона необходим энергисточник, обладающий автономностью, надежностью и маневренностью. Уникальный

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

© Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Легчанов М.А., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., 2024

научный, конструкторский и производственный опыт, накопленный в атомной отрасли при создании судовых реакторных установок (РУ) [1] является основой развития приоритетного проекта Госкорпорации «Росатом» — атомных станций малой мощности (АСММ) [2].

На сегодняшний день ведутся конструкторские работы по созданию АСММ с новейшей РУ «РИТМ-200С» [3], разработанной в АО «ОКБМ Африкантов». Проектом РУ предусматривается кассетная активная зона с топливом повышенной ураноемкости для увеличения энергоэффективности станции. Конструкция тепловыделяющих сборок (ТВС) новой кассетной активной зоны базируется на опыте создания и эксплуатации топливных сборок РУ новых атомных ледоколов.

Конструктивные особенности ТВС кассетной активной зоны обусловили необходимость экспериментального определения влияния отдельных конструктивных элементов её входного участка, а именно дроссельной шайбы, на структуру поля аксиальной скорости потока теплоносителя на входе в активную часть твэльного пучка [4]. Особенности конструкции входного участка ТВС могут привести к изменению поля аксиальной скорости потока и, как следствие, к изменению условий работы элементной базы активной зоны, что, в свою очередь, может повлиять на ее теплотехническую надежность.

Обоснование теплотехнической надежности [5] опирается на теплогидравлический расчет, требующий уточнения отдельных важных гидродинамических характеристик потока, к которым относится поле аксиальной скорости потока теплоносителя. Таким образом, особенности конструкции кассетной активной зоны требуют проведения комплекса научно-исследовательских работ, в том числе экспериментального изучения поля аксиальной скорости потока во входном участке ТВС.

Исследовательский стенд и методика проведения экспериментов

Моделирование течения теплоносителя во входном участке ТВС проводилось сотрудниками НГТУ им. Р.Е. Алексеева на исследовательском аэродинамическом стенде в Институте ядерной энергетики и технической физики им. Ф.М. Митенкова [6–10]. Исследовательская установка выполнена в виде разомкнутого контура с воздушной рабочей средой и состоит из системы нагнетания воздушного потока, экспериментальных моделей (ЭМ) и измерительного комплекса. Течение водяного теплоносителя моделируется воздухом, основываясь на теории гидродинамического подобия [11]. Рабочие параметры исследовательской установки: рабочая среда — воздух, производительность вентилятора — $18540 \text{ м}^3/\text{ч}$, полное давление в ресиверной емкости — 6 кПа.

ЭМ представляет собой канал, состоящий из двух участков разной формы — круглой и шестигранной. Канал круглой формы имитирует сегмент входного участка, находящийся внутри отверстий нижней опорной плиты реактора, а шестигранный канал — начальный участок ТВЭЛного пучка активной зоны (рис. 1).

Канал круглой формы включает макет обтекателя трубы центрального вытеснителя с закрепленными на нем макетами шарикового замка и прижимной гайкой. Во фланцевом соединении канала круглой формы установлена дроссельная шайба, состоящая из двух дисков, закрепленных на общей втулке и поворачивающихся друг относительно друга с шагом в 3° , максимальный проектный угол поворота составляет 15° (рис. 2).

Канал шестигранной формы включает имитатор диффузора с узлом крепления ТВЭЛов к нему и уголками жесткости (рис. 3), поглощающую решетку, имитатор трубы центрального вытеснителя, фрагмент твэльного пучка и макет дистанционирующей

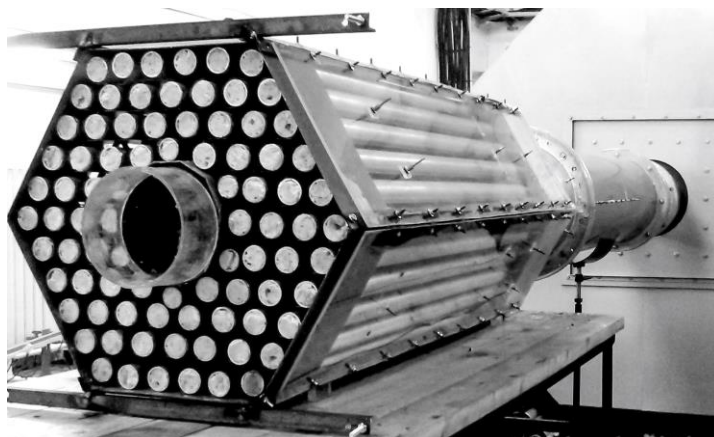


Рис. 1. Экспериментальная модель.

решетки (рис. 4). Все элементы ЭМ увеличены на коэффициент геометрического подобия 5,79 относительного натурного изделия.

Изучение процесса перестроения поля аксиальной скорости потока на входе в ТВС осуществлялось с помощью пневмометрического метода, заключающегося в измерении величины осевой скорости воздушного потока пневмометрическим датчиком с погрешностью, не превышающей 5 %.

Исследование поля осевой скорости потока проводилось в пяти сечениях по длине ЭМ: 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 первой дистанционирующей решеткой (сечение V5). Расположение сечений измерения по длине ЭМ приведено на рис. 5. Пример расположения точек измерений в сечениях V1, V4 и V5 представлен на рис. 6.

Особенности течения теплоносителя во входном участке ТВС выявлялись на основе анализа картограмм и графиков распределения безразмерной аксиальной скорости потока в поперечном сечении ЭМ. Значения безразмерной аксиальной скорости (W_z/W_{cp}) получены нормированием ее локального значения (W_z) в точке измерения на величину

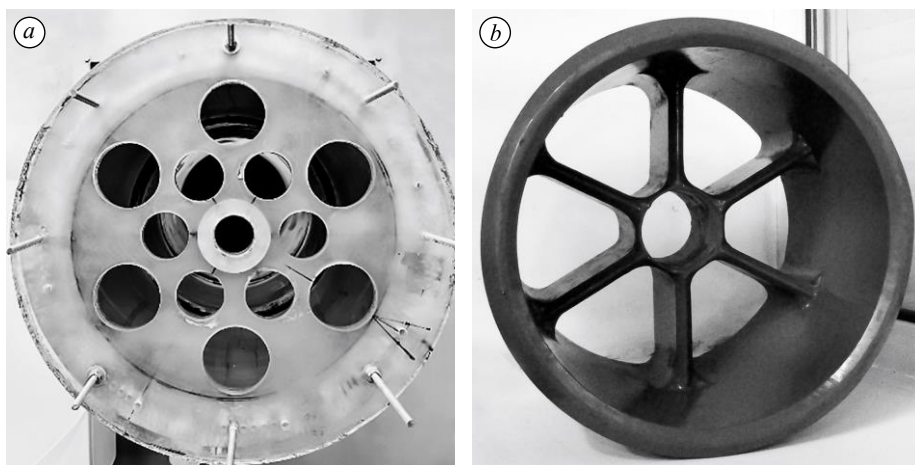


Рис. 2. Внутренние элементы канала круглого сечения: дроссельная шайба (а), проточная часть шарикового замка (б).

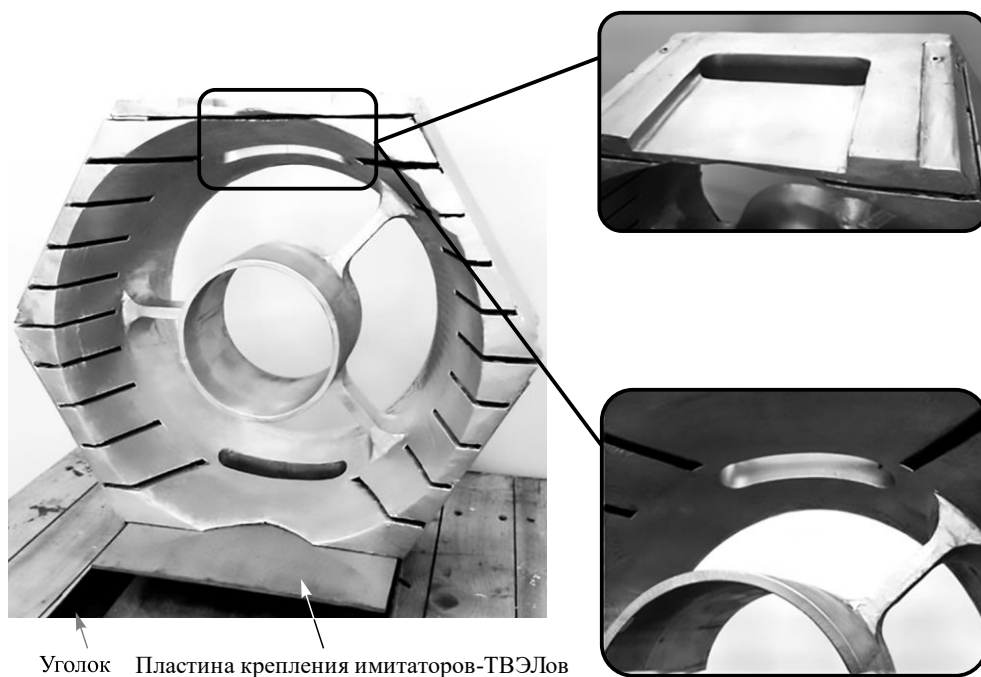


Рис. 3. Внешний вид диффузора.

среднерасходной скорости воздушной рабочей среды на входе в ЭМ (W_{cp}). Далее в тексте статьи используются только безразмерные величины аксиальной скорости.

Измерения проводились в зоне автомодельного течения воздушной рабочей среды, характеризующейся идентичностью безразмерных профилей скорости как для воздушной, так и для водяной среды. Следовательно, опытные данные, полученные в ходе

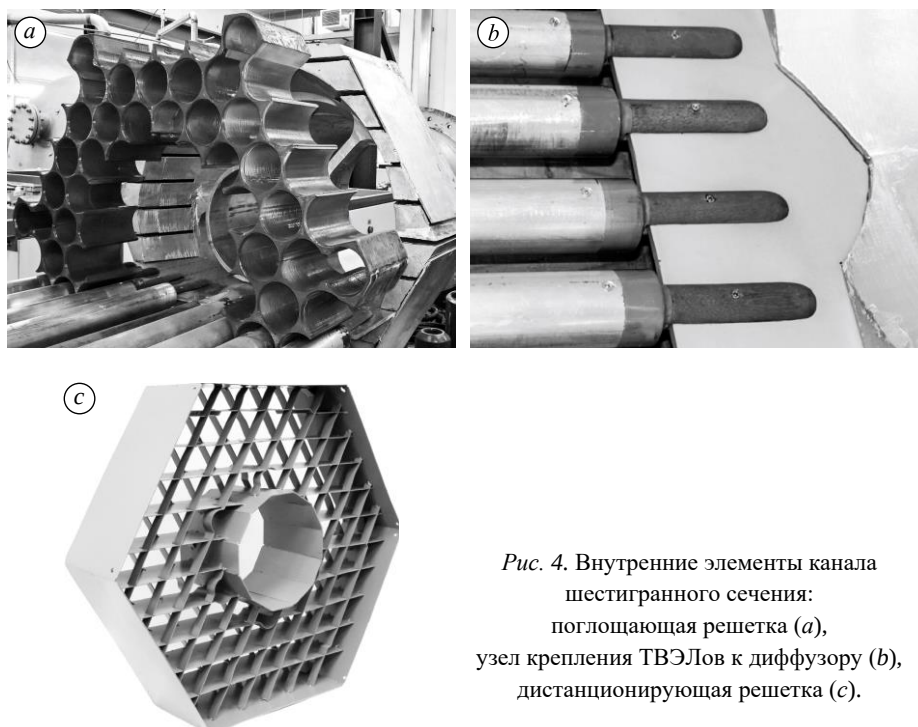


Рис. 4. Внутренние элементы канала шестигранного сечения:
поглощающая решетка (а),
узел крепления ТВЭЛОВ к диффузору (b),
дистанционирующая решетка (с).

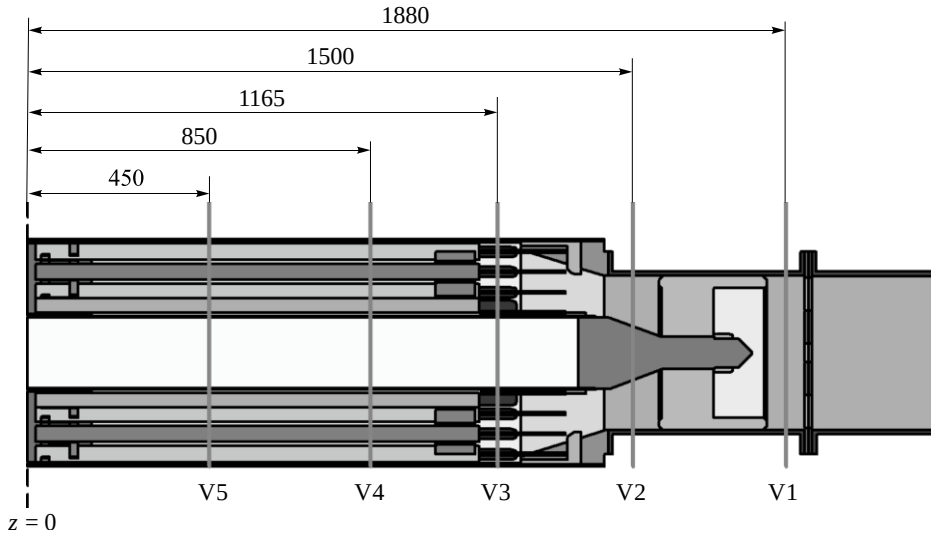


Рис. 5. Продольные координаты сечений проведения измерений.
Размеры приведены в мм.

эксперимента, могут быть применены при анализе течения теплоносителя в штатной топливной кассете. Все измерения проводились при среднерасходной скорости воздушной рабочей среды на входе в ЭМ, лежащей в диапазоне $13 \div 24,5$ м/с, и числе Рейнольдса,

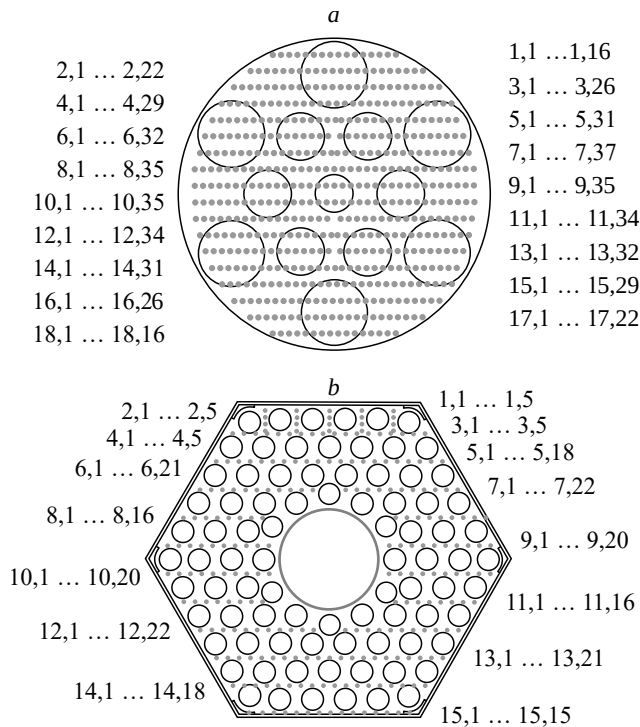


Рис. 6. Примеры расположения точек измерения.
а — за дроссельной шайбой (сечение V1), б — в ТВЭЛном пучке за поглощающей решеткой (сечение V4) и перед первой дистанционирующей решеткой (сечение V5).

лежащем в диапазоне $35000 \div 65000$. Столь широкий диапазон величин среднерасходной скорости потока и числа Рейнольдса обусловлен проведением двух этапов экспериментальных исследований:

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

— при максимально закрытом проходном сечении дроссельной шайбы за счет поворота ее дисков друг относительно друга на 15° , что соответствует минимальным величинам скорости и числа Рейнольдса.

Изучение распределения поля аксиальной скорости потока во входном участке ТВС при полностью открытом и максимально перекрытом проходном сечении шайбы продиктовано необходимостью получения точной экспериментальной информации о поле аксиальной скорости потока в ТВС, установленных в центральной части и на периферии кассетной активной зоны соответственно.

Результаты экспериментальных исследований

1. За отверстиями дроссельной шайбы (сечение V1) образуются мощные струйные течения теплоносителя. Локальные максимумы аксиальной скорости потока располагаются по центрам проходных отверстий. Величина относительной аксиальной скорости потока в них составляет $3,6 \div 4,1$.

За шайбой на периферии канала образуются обширные области с низкой аксиальной скоростью потока. Величина относительной аксиальной скорости в них составляет $0,4 \div 0,9$. Также низкие величины аксиальной скорости потока $0,4 \div 0,8$ наблюдаются вокруг центрального отверстия. Картограмма распределения поля относительной аксиальной скорости за шайбой приведена на рис. 7.

Перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы привело к значительному росту аксиальной скорости потока за проходными отверстиями, а также к увеличению площади, занимаемой областями с низкими аксиальными скоростями, соответственно величины относительной аксиальной скорости составили $7 \div 8,5$ и $0,9 \div 1,7$.

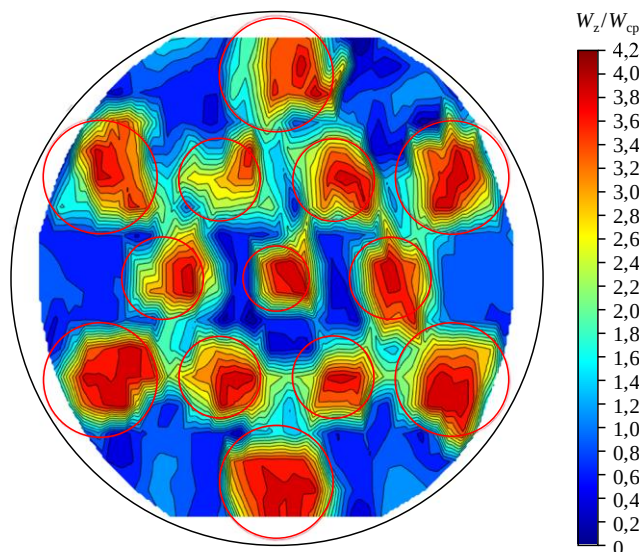


Рис. 7. Поле относительной аксиальной скорости потока за дроссельной шайбой (сечение V1) с полностью открытым проходным сечением.

2. За шариковым замком (сечение V2) однородность поля аксиальной скорости в значительной степени зависит от величины площади проходного сечения дроссельной шайбы. При полностью открытом проходном сечении шайбы наблюдается неоднородность поля аксиальной скорости потока, величины безразмерной аксиальной скорости лежат в диапазоне $1 \div 2,7$.

За ребрами замка и вокруг наконечника центрального вытеснителя присутствуют области с низкими величинами относительной аксиальной скорости потока, которые составляют $1,1 \div 1,5$ и $1 \div 1,3$ соответственно. Наибольшие величины относительной аксиальной скорости потока $2 \div 2,6$ расположены между ребрами шарикового замка, преимущественно в областях поперечного сечения, лежащих за отверстиями шайбы. Распределение относительной аксиальной скорости потока за шариковым замком при полностью открытом проходном сечении шайбы представлено на рис. 8. В целом за ребрами шарикового замка наблюдается эффект выравнивания поля аксиальной скорости потока при полностью открытом проходном сечении дроссельной шайбы.

Перекрытие проходного сечения шайбы привело к образованию за шариковым замком значительной неоднородности течения теплоносителя, выраженной наличием локальных максимумов относительной аксиальной скорости и обширных областей с низкими величинами безразмерной аксиальной скорости потока, которые составляют $2,6 \div 3,2$ и $0,4 \div 0,8$ соответственно. Локальные максимумы аксиальной скорости смещены в поперечном сечении канала относительно отверстий шайбы, что обусловлено частичным перекрытием проходного сечения последних, а также наличием ребер жесткости шарикового замка. Распределение относительной аксиальной скорости потока за шариковым замком при максимально перекрытом проходном сечении шайбы представлено на рис. 9.

3. В узле крепления ТВЭЛов к диффузору (сечение V3) наблюдается значительная неоднородность относительной аксиальной скорости потока, обусловленная как геометрией элементов конструкции входного участка ТВС, расположенных перед диффузором по направлению течения теплоносителя, так и особенностями конструкции самого диффузора.

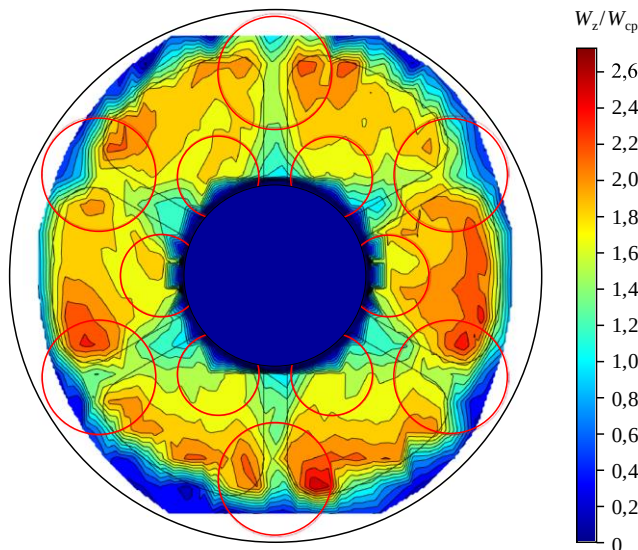


Рис. 8. Поле относительной аксиальной скорости потока за шариковым замком (сечение V2) с полностью открытым проходным сечением дроссельной шайбы.

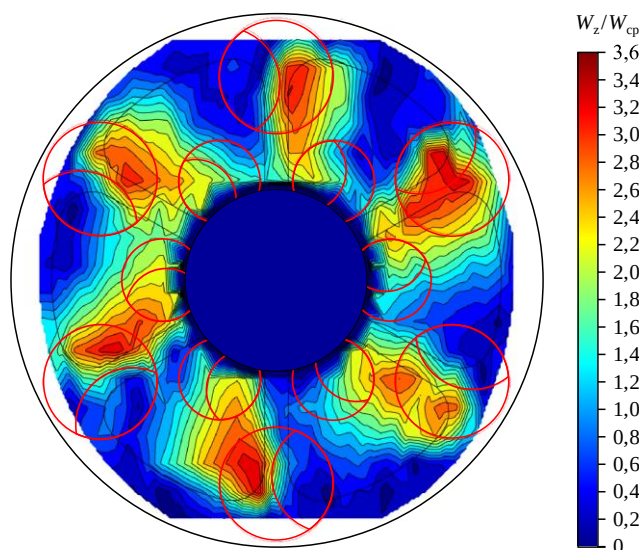


Рис. 9. Поле относительной аксиальной скорости потока за шариковым замком (сечение V2) с максимально перекрытым проходным сечением дроссельной шайбы.

За диффузором, у поверхности чехла ТВС, образуется область низкой аксиальной скорости потока, охватывающей один-два ряда ТВЭЛов от чехла, здесь величина относительной аксиальной скорости составляет $(0,2 \div 0,6)$. Образование этой области обусловлено торможением потока у поверхности чехла ТВС и наличием внешней поверхности диффузора, выполненной без возможности сквозного аксиального течения теплоносителя.

В области проходного сечения диффузора наблюдается разброс значений относительной аксиальной скорости потока, которые лежат в диапазоне $0,7 \div 1,9$. Столь значительный разброс в величинах скорости потока во многом обусловлен наличием неоднородности течения потока за шайбой и шариковым замком, а также наличием трех силовых ребер диффузора и кольца под крепление трубы центрального вытеснителя.

Ввиду неравности углов установки силовых ребер образуется локальный максимум относительной аксиальной скорости потока, расположенный между ребрами, угол установки которых друг относительно друга является наименьшим, величина скорости потока в локальном максимуме составляет $1,5 \div 1,9$. Вокруг кольца под крепление трубы центрального вытеснителя относительная аксиальная скорость имеет величину $0,7 \div 1,2$. Картограмма распределения относительной аксиальной скорости представлена на рис. 10.

Перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы привело к значительному расширению области низкой аксиальной скорости потока у поверхности чехла за диффузором, которая охватывает два-три ряда ТВЭЛов, а величина относительной скорости составила $0,1 \div 0,7$. В проходном сечении диффузора наблюдаются множественные локальные максимумы аксиальной скорости потока, обусловленные струйными течениями теплоносителя за отверстиями шайбы при перекрытии их проходного сечения. Величины относительной аксиальной скорости в ее локальных максимумах составили $1,6 \div 2,1$. Область низкой аксиальной скорости вокруг кольца под установку трубы центрального вытеснителя отсутствует. Картограмма распределения относительной аксиальной скорости потока в узле крепления твэлов к диффузору приведена на рис. 11.

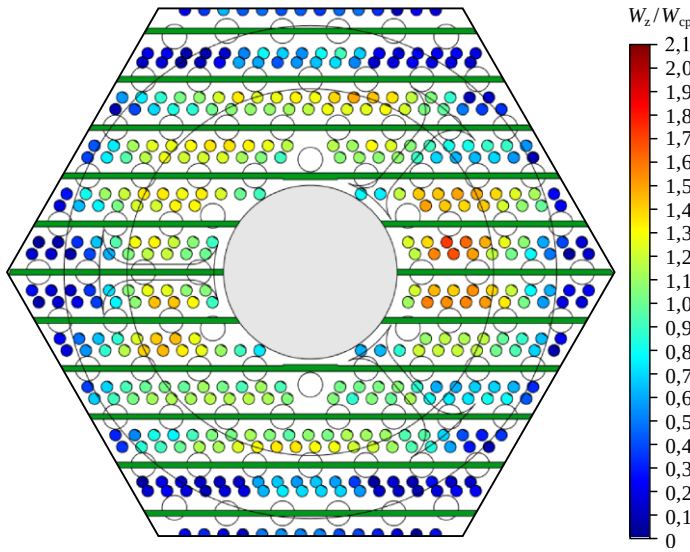


Рис. 10. Относительная аксиальная скорость потока в узле крепления ТВЭЛов к диффузору (сечение V3) с полностью открытым проходным сечением дроссельной шайбы.

4. Во входном участке ТВЭЛЬНОГО пучка за поглощающей решеткой образуются две области с низкими величинами аксиальной скорости потока, расположенные у граней чехла ТВС, параллельных пластинам крепления твэлов к диффузору. Эти области охватывают один периферийный ряд твэлов, а величина относительной аксиальной скорости потока в них составляет $0,3 \div 0,6$. Также области с низкими аксиальными скоростями потока расположены в углах твэльного пучка, а величина относительной скорости в них лежит в диапазоне $0,8 \div 0,9$.

В целом по оставшейся области поперечного сечения ТВЭЛЬНОГО пучка наблюдается неоднородность аксиальной скорости потока, обусловленная конструкцией

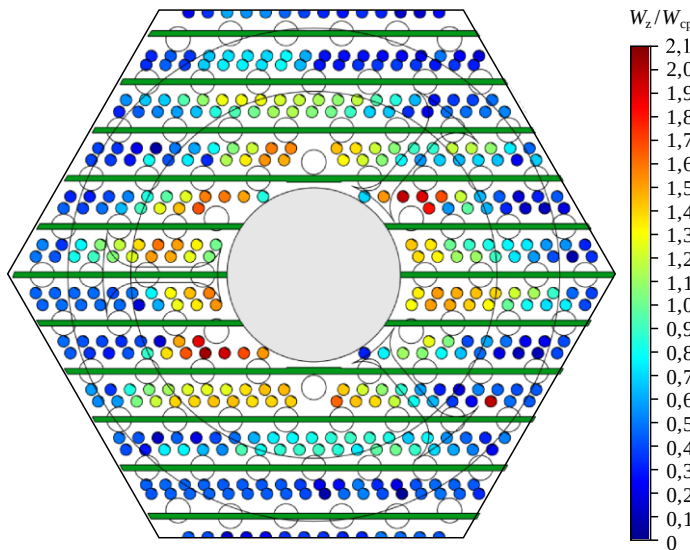


Рис. 11. Относительная аксиальная скорость потока в узле крепления ТВЭЛов к диффузору (сечение V3) с максимально перекрытым проходным сечением дроссельной шайбы.

поглощающей решетки, движение потока теплоносителя через которую организовано кольцевыми зазорами, образованными поверхностью твэлов и поверхностью отверстий в решетке под их установку. Относительная аксиальная скорость потока в данной области ТВЭльного пучка составляет $0,9 \div 1,9$. Картограмма распределения относительной скорости потока приведена на рис. 12.

Перекрытие проходного сечения шайбы привело к расширению двух ярко выраженных зон низкой аксиальной скорости потока с одного до двух рядов ТВЭлов, а также к незначительному снижению относительной аксиальной скорости в них до величин $0,2 \div 0,6$. Вокруг трубы центрального вытеснителя образуются локальные максимумы аксиальной скорости, появление которых обусловлено появлением мощных аксиальных течений теплоносителя за проходными отверстиями дроссельной шайбы и конструкцией поглощающей решетки. Область локальных максимумов скорости потока охватывает один ряд ТВЭлов вокруг центрального вытеснителя, величина относительной скорости составила здесь $1,6 \div 2$. Также наблюдается снижение относительной аксиальной скорости потока в оставшейся области твэльного пучка до величин $(0,8 \div 1,5)$. Распределение относительной аксиальной скорости потока по сечению входной части твэльного пучка приведено на рис. 13.

Комплексный сравнительный анализ графических распределений относительной аксиальной скорости потока по всем точкам измерения во входной части ТВЭльного пучка с открытым и максимально перекрытым проходными сечениями дроссельной шайбы, приведенных на рис. 14 и 15, показывает наличие трех характерных областей течения теплоносителя со значительно отличающимися относительными аксиальными скоростями: участки на графиках, отмеченные как I и II, демонстрируют наличие зон с низкими относительными аксиальными скоростями в двух областях — расположенных у чехла ТВС и параллельных пластинам крепления ТВЭлов к диффузору, где величины скорости в два раза ниже, чем в остальной области пучка ТВЭлов (участок III на графиках).

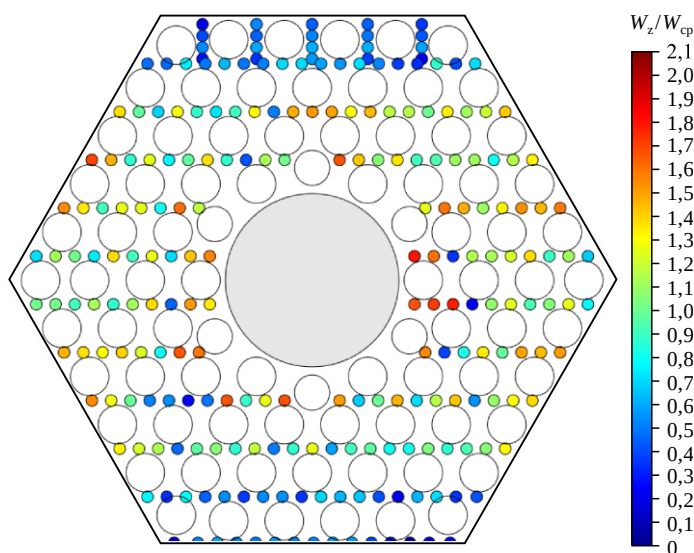


Рис. 12. Относительная аксиальная скорость потока во входном участке ТВЭльного пучка за поглощающей решеткой (сечение V4) с полностью открытым проходным сечением дроссельной шайбы.

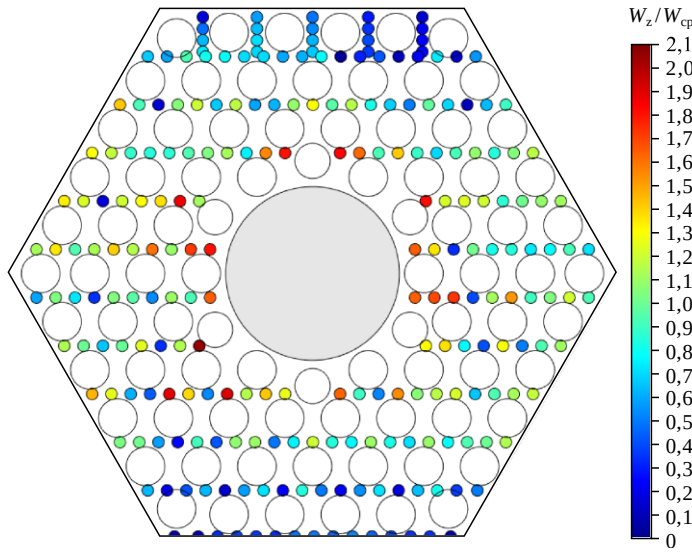


Рис. 13. Относительная аксиальная скорость потока во входном участке ТВЭЛЬНОГО пучка за поглощающей решеткой (сечение V4) с максимально перекрытым проходным сечением дроссельной шайбы.

Усредненное значение относительной аксиальной скорости потока, приведенное на рис. 14, при полностью открытом проходном сечении шайбы на участках I и II составило 0,5, а на участке III — 1,15.

Распределение относительной аксиальной скорости потока, приведенное на рис. 15, при максимально перекрытом проходном сечении шайбы показывает незначительное снижение скорости течения потока теплоносителя в периферийных областях (участки I и III на графике) и оставшемся проходном сечении твэльного пучка (участок II на графике), усредненные значения относительной аксиальной скорости составили 0,48 и 1,05 соответственно.

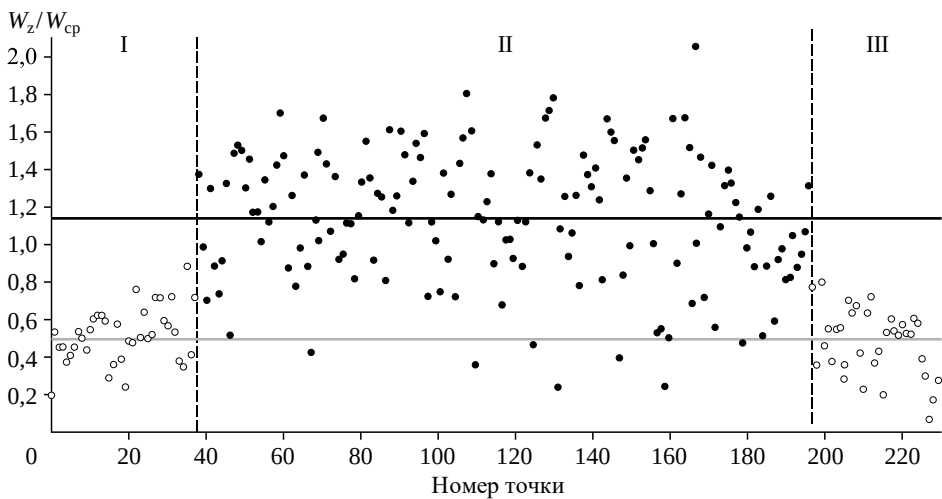


Рис. 14. График распределения относительной аксиальной скорости потока по всем точкам измерения во входном участке ТВЭЛЬНОГО пучка за поглощающей решеткой (сечение V4) с полностью открытым проходным сечением дроссельной шайбы.

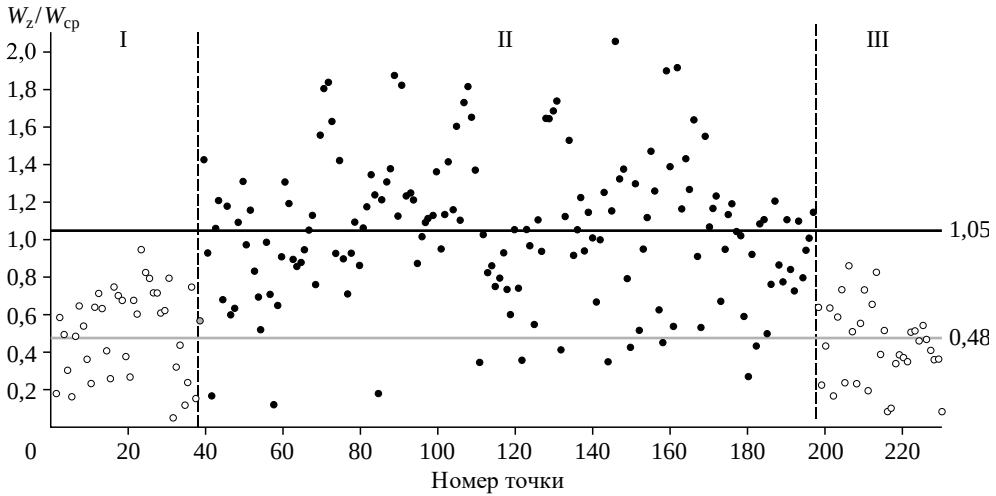


Рис. 15. График распределения относительной аксиальной скорости потока по всем точкам измерения во входном участке ТВЭльного пучка за поглощающей решеткой (сечение V4) с максимально перекрытым проходным сечением дроссельной шайбы.

5. При движении потока теплоносителя по длине ТВЭльного пучка наблюдается низкоинтенсивный процесс выравнивания поля аксиальной скорости потока. Перед первой дистанционирующей решеткой (сечение V5) сохраняются ярко выраженные области низкой аксиальной скорости потока, находящиеся напротив двух граней чехла ТВС (рис. 16) и охватывающие один периферийный ряд ТВЭЛОВ, относительная аксиальная скорость потока в данных областях составляет $0,6 \div 0,8$. В оставшейся области проходного сечения ТВЭльного пучка относительная аксиальная скорость потока составляет $0,9 \div 1,5$.

Перекрытие проходного сечения шайбы приводит к значительному перераспределению аксиальной скорости потока перед первой дистанционирующей решеткой.

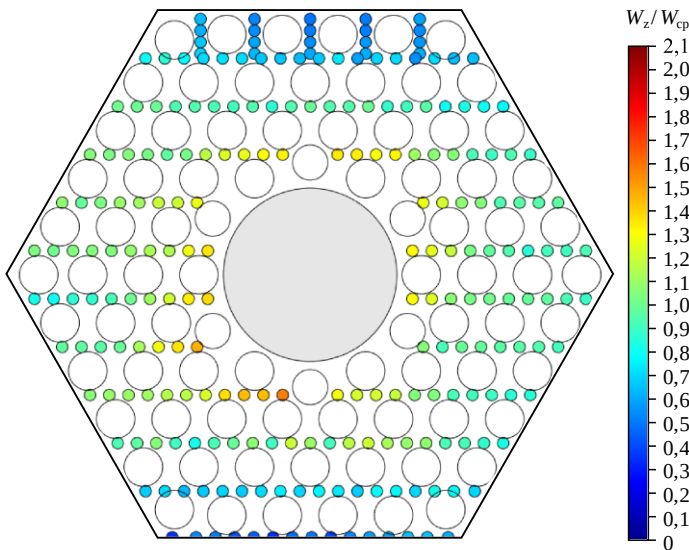


Рис. 16. Относительная аксиальная скорость потока в ТВЭльном пучке перед первой дистанционирующей решеткой (сечение V5) с полностью открытым проходным сечением дроссельной шайбы.

Образуется локальная область вокруг трубы центрального вытеснителя с высокими величинами относительной аксиальной скорости потока, составляющими $1,3 \div 1,6$. Две области низкой аксиальной скорости охватывают только один периферийный ряд ТВЭЛов, а величина относительной скорости в них лежит в диапазоне $0,5 \div 0,8$. В оставшейся области проходного сечения твэлов величина относительной аксиальной скорости снижается и составляет $(0,8 \div 1,2)$. Распределение относительной скорости потока приведено на рис. 17.

Таким образом, перекрытие проходного сечения шайбы не приводит к увеличению области поперечного сечения ТВЭЛЬНОГО пучка, занимаемой низкими аксиальными скоростями потока, в отличие от сечения, расположенного за поглощающей решеткой. Это свидетельствует о снижении влияния мощных аксиальных потоков теплоносителя за проходными отверстиями шайбы на течение теплоносителя в пучке ТВЭЛов. Однако наличие влияния аксиальных течений теплоносителя, образовавшихся при перекрытии проходного сечения шайбы, визуализируется областью высокой аксиальной скорости вокруг центрального вытеснителя, лежащей именно в зоне основного влияния данных течений.

Сравнительный анализ графических распределений относительной аксиальной скорости потока по всем точкам измерения в ТВЭЛЬНОМ пучке перед первой дистанционирующей решеткой, приведенных на рис. 18 и 19, показывает наличие влияния степени перекрытия проходного сечения тарировочной шайбы на течение теплоносителя в активной части пучка ТВЭЛов, а именно:

— наблюдается снижение величины усредненной относительной аксиальной скорости в двух областях у чехла ТВС (участки I и II на графиках) более чем на 10 % — с 0,73 до 0,64;

— происходит незначительное снижение величины усредненной относительной аксиальной скорости (в пределах 5 %) в оставшейся части проходного сечения твэльного пучка (участок III на графиках) — с 1,1 до 1,06;

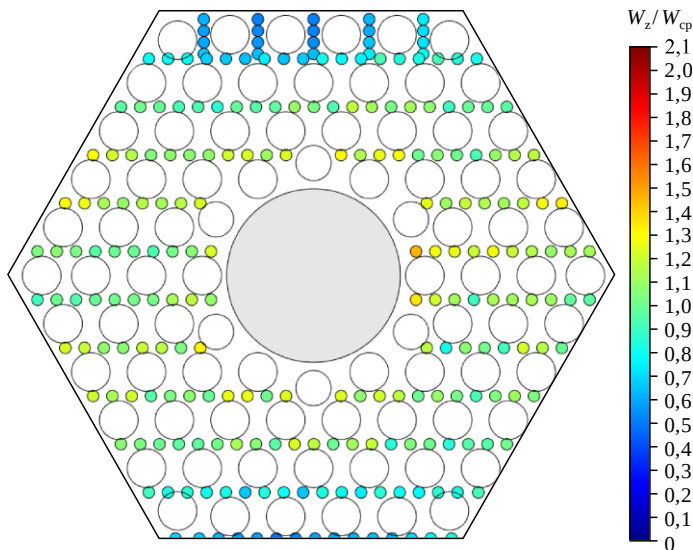


Рис. 17. Относительная аксиальная скорость потока в ТВЭЛЬНОМ пучке перед первой дистанционирующей решеткой (сечение V5) с максимально перекрытым проходным сечением дроссельной шайбы.

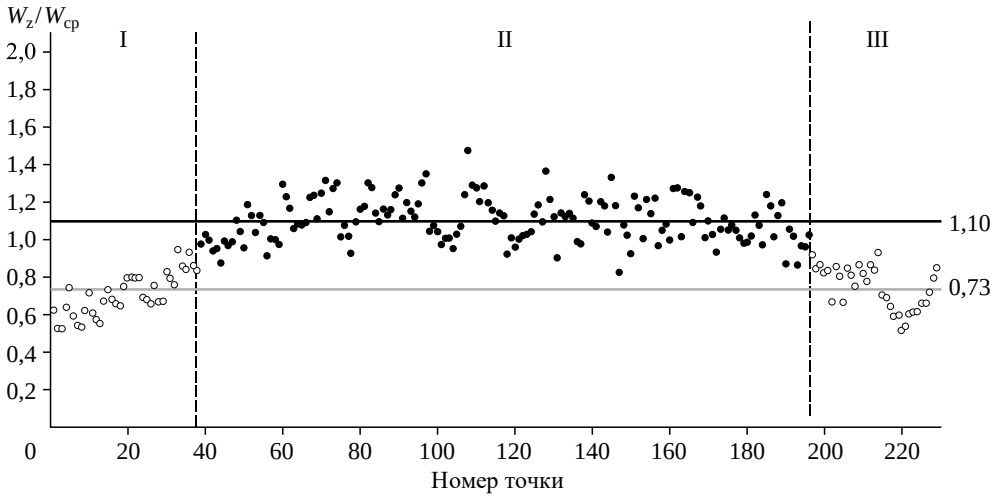


Рис. 18. График распределения относительной аксиальной скорости потока по всем точкам измерения в ТВЭльном пучке перед первой дистанционирующей решеткой (сечение V5) с полностью открытым проходным сечением дроссельной шайбы.

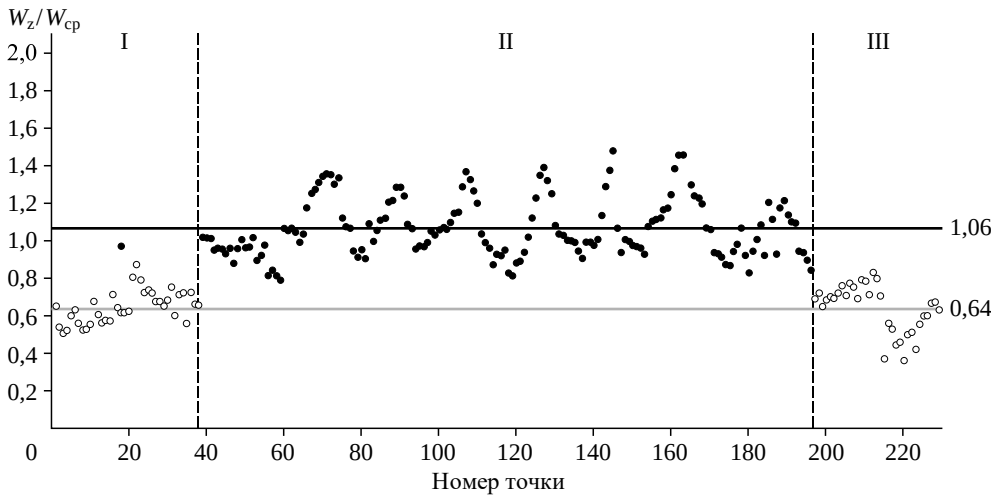


Рис. 19. График распределения относительной аксиальной скорости потока по всем точкам измерения в ТВЭльном пучке перед первой дистанционирующей решеткой (сечение V5) с максимально перекрытым проходным сечением дроссельной шайбы.

— наличие области с высокими значениями относительной аксиальной скорости вокруг трубы центрального вытеснителя визуализировано на участке III графика, приведенного на рис. 19, локальными пиками скорости, значительно превышающими ее усредненную величину.

Заключение

На основании вышеизложенных результатов экспериментов выявлено влияние геометрии входного участка ТВС кассетного типа на течение потока теплоносителя в ТВЭльном пучке. Это влияние характеризуется образованием областей с низкими величинами аксиальной скорости потока, расположенными в периферийных рядах ТВЭЛов у граней

чехла ТВС, параллельных пластинам крепления ТВЭЛов к диффузору. Величины относительной аксиальной скорости в выделенных областях лежат в диапазоне $0,2 \div 0,8$ и зависят от степени удаленности от дроссельной шайбы и диффузора.

Перекрытие проходного сечения шайбы приводит к значительному перераспределению поля аксиальной скорости потока в ТВЭльном пучке, характеризующемуся наличием области с высокой аксиальной скоростью вокруг трубы центрального вытеснителя, при этом величины относительной скорости составили $1,3 \div 2$ и продемонстрировали зависимость от степени удаленности от дроссельной шайбы, диффузора и поглощающей решетки. Также при перекрытии проходного сечения шайбы отмечено расширение областей низкой аксиальной скорости потока с одного ряда ТВЭЛов до двух.

Таким образом, выявленные неоднородности аксиальной скорости потока могут оказать значительное влияние на процессы возникновения и развития кризиса теплоотдачи в обширной области ТВЭльного пучка ТВС кассетного типа. Данные неоднородности течения теплоносителя необходимо учитывать при обосновании теплотехнической надежности активных зон РУ новейших атомных ледоколов и атомных станций малой мощности.

Список литературы

1. Зверев Д.Л., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н., Галицких В.Ю., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Кабин С.В., Турусов А.Ю. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние // Атомная энергия. 2020. Т. 129, № 1. С. 29–37.
2. Беляев В.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н., Хизбуллин А.М., Лепехин А.Н., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Соколов А.Н., Турусов А.Ю. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития // Атомная энергия. 2020. Т. 129, № 1. С. 37–43.
3. Петрунин В.В. Реакторные установки для атомных станций малой мощности // Вестник российской академии наук. 2021. Т. 91, № 6. С. 528–540.
4. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: Ленанд, 2020. 352 с.
5. Дмитриев С.М., Баринев А.А., Самойлов О.Б., Хробостов А.Е. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов // Атомная энергия. 2016. Т. 120, № 5. С. 270–275.
6. Варенцов А.В., Доронков Д.В., Купричева Е.С., Солицев Д.Н., Сорокин В.Д. Экспериментальные исследования локального массообмена и эффективности перемешивания теплоносителя дистанционирующими решетками в ТВС реактора КЛТ-40С // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 1. С. 107–113.
7. Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Исследование массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВБЭР-300 с целью обоснования их эффективности // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5. С. 197–205.
8. Варенцов А.В., Доронков Д.В., Илютина Е.М., Каратушина И.В., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Особенности течения теплоносителя в ТВС «КВАДРАТ» реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015, № 3. С. 134–143.
9. Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования течения потока теплоносителя в кассетной активной зоне реактора КЛТ-40С. Инж.-физ. журнал. 2017. Т. 90, № 4. С. 988–996.
10. Самойлов О.Б., Шипов Д.Л., Куприянов А.В., Шолин Е.В., Вишнева Т.Ю., Молодцов А.А., Осин А.Б., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Доронков Д.В., Морозкин О.Н. Исследование эффективности пластинчатых решеток-интенсификаторов теплообмена в сборках типа ТВСА-Г // Атомная энергия. 2020. Т. 128, № 1. С. 18–23.
11. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.

*Статья поступила в редакцию 30 мая 2023 г.,
после доработки — 13 сентября 2023 г.,
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*