

ГИДРОДИНАМИКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ВЫХОДНОМ УЧАСТКЕ ТОПЛИВНОЙ КАССЕТЫ С ГОЛОВКАМИ РАЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА РИТМ АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ¹

© 2023 г. С. М. Дмитриев^а, Т. Д. Демкина^а, А. А. Добров^а, Д. В. Доронков^{а, *}, Д. С. Доронкова^а,
М. А. Легчанов^а, А. Н. Пронин^а, А. В. Рязанов^а, Д. Н. Солнцев^а, А. Е. Хробостов^а

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

*e-mail: nevid000@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.

После доработки 02.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований и сравнительного анализа гидродинамики теплоносителя в выходном участке топливной кассеты за головками, имеющими разные конструкции. Рассматриваемые топливные кассеты предназначены для установки в активной зоне реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности наземного размещения. Целью работы являлось изучение распределения осевой скорости и расхода потока теплоносителя на выходе из пучка твэлов, за головками, имеющими разные конструкции, перед трубой отбора теплоносителя и в отверстиях верхней опорной плиты, а также определение областей твэльного пучка, из которых наиболее вероятно попадание потока теплоносителя в трубу отбора и, соответственно, на термометр сопротивления, установленный в эту трубу. Эксперименты проводились на исследовательском аэродинамическом стенде с воздушной рабочей средой на модели выходного участка топливной кассеты, в состав которого входят фрагмент выходной части пучка твэлов с дистанционирующими решетками, макеты головок двух типов, верхней опорной плиты и трубы отбора теплоносителя. При изучении скорости течения теплоносителя в выходной части топливной кассеты использовались пневмометрический метод и метод впрыска контрастной примеси. Измерения выполнялись по всему поперечному сечению модели. Гидродинамическая картина течения теплоносителя представлена картограммами распределения осевой скорости, расхода теплоносителя и контрастной примеси в поперечном сечении модели. Результаты исследований использовались специалистами конструкторских и расчетных подразделений ОКБМ им. И.И. Африкантова для обоснования инженерных решений при проектировании новых активных зон реакторов РИТМ. Результаты экспериментов собраны в базу данных и используются при валидации CFD-программы ЛОГОС, созданной сотрудниками РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИТМФ МГУ им. М.В. Ломоносова в качестве аналогов иностранных программ такого же класса, к которым относятся ANSYS, Star CCM+ и многие другие. Опытные данные также применены для валидации одномерных теплогидравлических кодов, используемых в ОКБМ им. И.И. Африкантова при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторных установок, к этому классу программ относится и теплогидравлический код КАНАЛ.

Ключевые слова: топливная кассета, головка, твэл, центральный вытеснитель, сливные окна, сливные отверстия, опорная плита, труба отбора, гидродинамика теплоносителя, перемешивание потока

DOI: 10.56304/S0040363623110048

Одним из главных направлений экономического развития России является освоение Арктики, которая обладает большими природными сырьевыми ресурсами. Для развития Арктической зоны страны необходимы энергоисточники, которым присущи такие весьма важные качества, как автономность, надежность и маневренность.

Энергоисточником такого рода может стать атомная станция малой мощности (АСММ) [1], приоритетный проект которой разрабатывается Госкорпорацией «Росатом», специалисты которой имеют уникальный научный, конструкторский и производственный опыт создания судовых реакторных установок (РУ).

В настоящее время ведутся конструкторские работы по созданию АСММ с новейшей РУ РИТМ-200С. В проекте этой РУ предусматрива-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

ется кассетная активная зона с топливом повышенной ураноемкости для увеличения энергоэффективности станции. Топливные кассеты новой активной зоны имеют несколько отличий от топливных сборок РУ атомных ледоколов [2–4], наиболее важными из которых, наряду с измененными геометрическими характеристиками твэльного пучка, конструкцией дистанционирующих решеток (ДР) и формой центрального вытеснителя, являются форма и размеры головки топливной кассеты. Изменение конструкции головки может привести к перестроению скорости и расхода потока теплоносителя в аксиальном направлении на выходе из твэльного пучка, а также сказаться на интенсивности перемешивания теплоносителя. Поэтому были проведены дополнительные экспериментальные исследования конструкции головки топливной кассеты.

Использование судовых реакторных технологий в установках наземного исполнения привело не только к значительному изменению конструкции активной зоны, но и к ужесточению требований к мониторингу теплогидравлических характеристик теплоносителя I контура, что обусловило необходимость увеличить число областей контроля температуры теплоносителя на выходе из активной зоны. Такой контроль осуществляется с помощью термометров сопротивления (ТСП), установленных в трубы отбора теплоносителя, расположенные напротив сливных окон и отверстий головки. На показания ТСП влияют неравномерность структуры осевого потока на выходе из твэльного пучка и головки, а также образующиеся локальные горячие или холодные струи теплоносителя. Они могут исказить показания ТСП и тем самым снизить точность определения температуры теплоносителя на выходе из активной зоны, достоверная же информация об этой температуре очень важна при переходных режимах работы РУ [5, 6].

Таким образом, экспериментальное изучение гидродинамики теплоносителя в выходном участке топливной кассеты, а также определение областей поперечного сечения твэльного пучка, из которых поток теплоносителя попадает на ТСП в трубе отбора среды, является весьма актуальным. Оно необходимо для обоснования конструкторских разработок элементов активных зон кассетного типа для АСММ наземного исполнения.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Моделирование гидродинамики теплоносителя в выходном участке топливной кассеты проводилось на исследовательском аэродинамическом стенде в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Эксперимен-

тальная установка выполнена в виде разомкнутого контура с воздушной рабочей средой и состоит из системы нагнетания воздушного потока, экспериментальных моделей (ЭМ) и измерительного комплекса [7, 8]. Течение водного теплоносителя моделировалось воздушным потоком с использованием теории гидродинамического подобия [9]. Рабочие параметры установки следующие: производительность вентилятора 18540 м³/ч, полное давление в ресиверной емкости 6 кПа.

Экспериментальные модели представляют собой каналы шестигранной формы с установленными внутрь элементами конструкции выходного участка топливной кассеты и состоят из пучка стержней с двумя ДР, макетов головок, центрального вытеснителя, верхней опорной плиты и трубы отбора теплоносителя к термометрам сопротивления (рис. 1, 2). Все элементы ЭМ, представленные на рис. 1 и 2, имеют увеличенные размеры, коэффициент геометрического подобия составил 5.79 относительно натурного изделия.

Отличительные особенности моделей выходного участка РУ атомного ледокола и АСММ – форма и число сливных окон, а также их расположение относительно сливных отверстий в головке топливной кассеты. Сливные окна головки предназначены для радиального выхода теплоносителя, сливные отверстия – для осевого. Головка выходного участка топливной кассеты РУ атомного ледокола оснащена тремя широкими сливными окнами и шестью сливными отверстиями. Шесть сливных отверстий находятся в периферийной части головки в углах шестиугольника, три широких сливных окна – в центральной части головки и асимметрично относительно шести сливных отверстий. Головка топливной кассеты РУ АСММ выполнена с шестью узкими сливными окнами в центре и шестью сливными отверстиями на ее периферии в углах шестиугольника. Шесть сливных окон и шесть сливных отверстий расположены в головке симметрично. Внешний вид головок топливных кассет реакторных установок атомного ледокола и АСММ приведен на рис. 3.

Для изучения процессов перестроения поля осевой скорости и перераспределения аксиального расхода теплоносителя в районе головки использовался пневмометрический метод, заключающийся в измерении осевой скорости воздушного потока пневмометрическим датчиком с погрешностью, не превышающей 5%.

Области поперечного сечения твэльного пучка, из которых происходит попадание потока в трубу отбора теплоносителя к ТСП, определяли методом впрыска контрастной примеси (газ пропан) в поток воздушной рабочей среды, который позволяет визуализировать данный процесс. Метод впрыска контрастной примеси заключается в следующем:

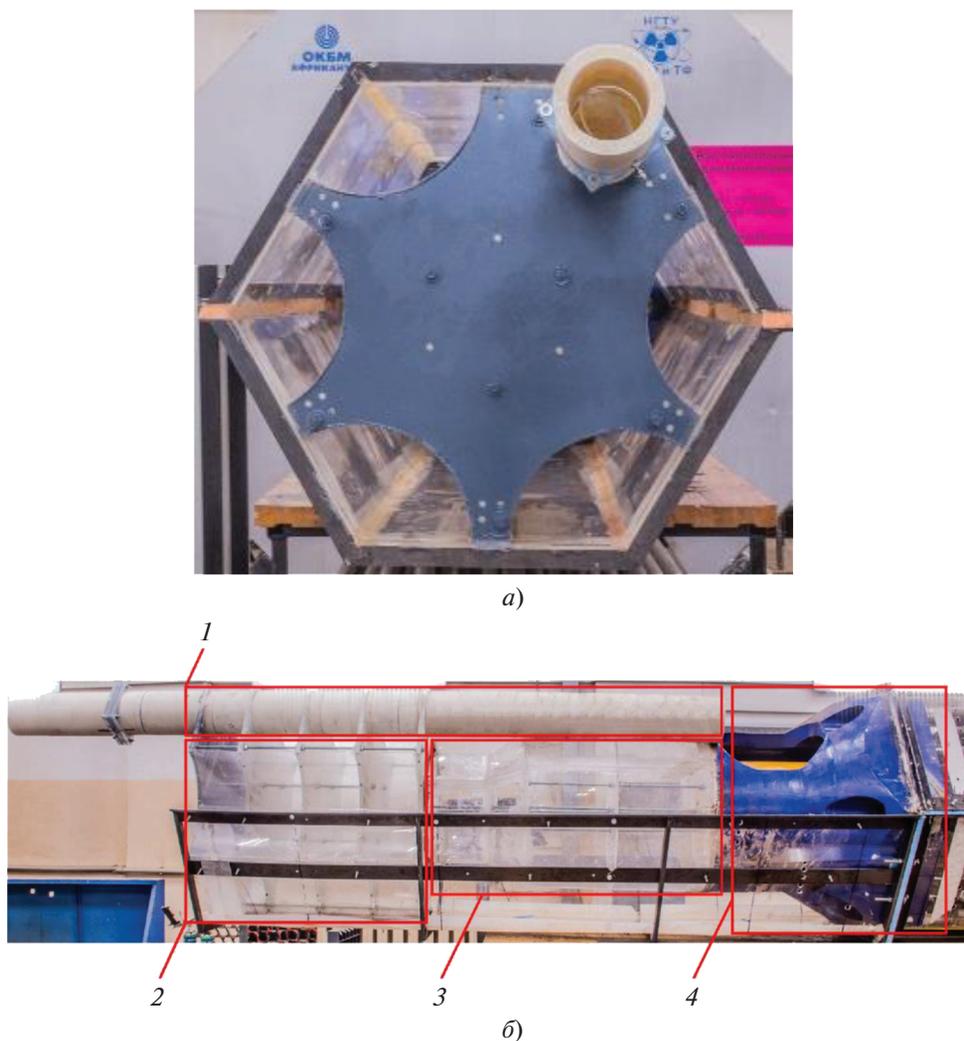


Рис. 1. Вид выходного сечения (а) и общей структуры (б) экспериментальной модели.
 1 – имитатор трубы отбора теплоносителя; 2 – имитатор верхней опорной плиты; 3 – имитатор верхней части головки кассетной ТВС; 4 – имитатор нижней части головки кассетной ТВС

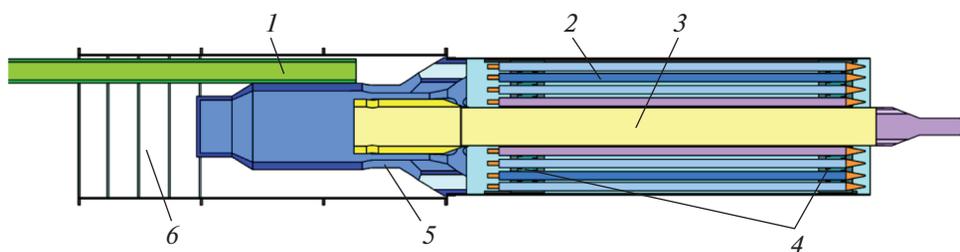


Рис. 2. Общая схема расположения элементов модели.
 1 – имитатор трубы отбора теплоносителя на ТСП; 2 – твэльный пучок; 3 – макет центрального вытеснителя; 4 – макеты дистанционирующих решеток; 5 – макет головки; 6 – макет верхней опорной плиты

примесь через впускной зонд подается в твэльный пучок перед дистанционирующей решеткой. Расстояние между впускным зондом и решеткой подобрано таким образом, чтобы при входе в решетку примесь регистрировалась только в преде-

лах одной ячейки, образованной тремя твэлами-имитаторами;

поперечное сечение модели разбивается на зоны измерения, в которых концентрация примеси определяется специальным отборным зондом в

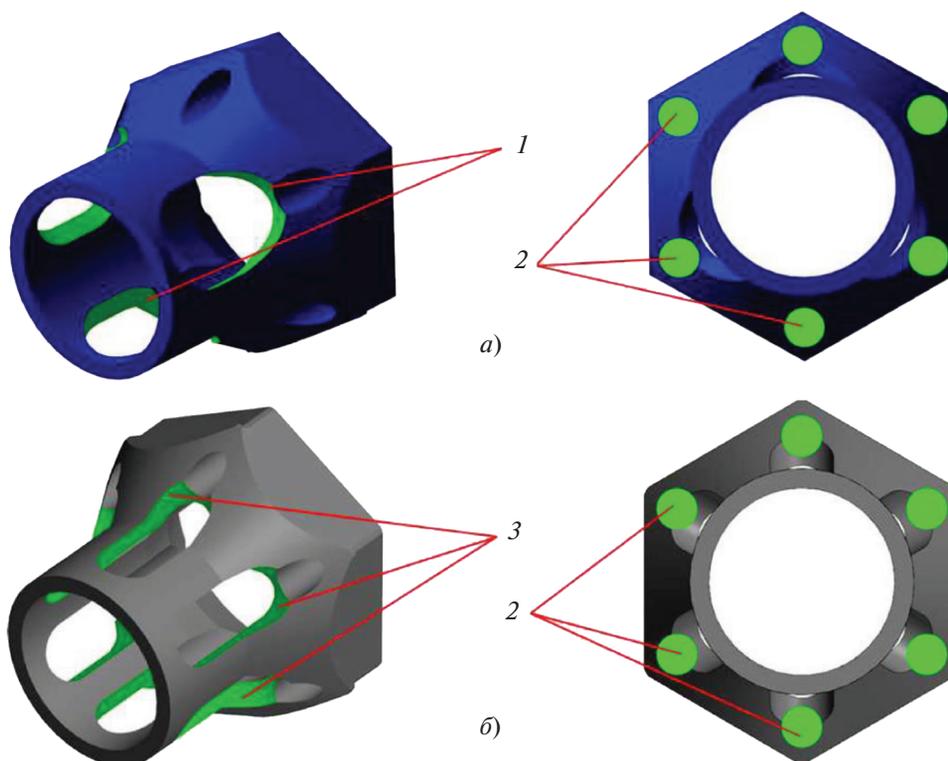


Рис. 3. Внешний вид головки топливной кассеты РУ атомного ледокола (а) и головки топливной кассеты РУ АСММ (б). 1 – три широких сливных окна; 2 – шесть круглых сливных отверстий; 3 – шесть узких сливных окон

нескольких сечениях по длине модели с погрешностью, не превышающей 1.5%;

зная концентрации примеси в соседних ячейках, аксиальную скорость потока в них и поперечную скорость в зазорах между ними, можно определить поперечный поток трассера.

Изучение полей осевой скорости и расхода потока, а также растекания контрастной примеси проводилось в шести поперечных сечениях экспериментальной модели: на выходе из пучка твэлов (сечение *V1*), на выходе из сливных отверстий и окон (сечения *V2* и *V3* соответственно), перед верхней опорной плитой в широкой части головки (сечение *V4*) и в узкой части (сечение *V5*), в сливных окнах верхней опорной плиты (сечение *V6*). Местоположение сечений, в которых проводились измерения, по длине модели показано на рис. 4. Пример расположения точек измерений представлен на рис. 5, а, б.

Для определения областей поперечного сечения твэльного пучка, из которых потоки теплоносителя могут проникнуть в трубу отбора к ТСП, были выделены регулярные ячейки, которые находились напротив трубы отбора и в противоположной части поперечного сечения твэльного пучка относительно входного сечения трубы отбора теплоносителя к ТСП, а также ячейки возле центрального вытеснителя и угловой части топ-

ливной кассеты (рис. 5, в). Через выбранные ячейки осуществлялся впрыск контрастной примеси.

Особенности течения теплоносителя в выходном участке ТВС выявляли, анализируя картограммы распределения безразмерной осевой скорости потока, а также картограммы растекания примеси в поперечном сечении экспериментальной модели. Значения безразмерной осевой скорости были получены в результате нормирования локальных данных по скоростям потока в точках измерения к среднерасходной скорости воздушной рабочей среды на входе в ЭМ.

Измерения проводились в зоне автомодельного течения воздушной рабочей среды исследовательского стенда. В этой зоне безразмерные профили скорости идентичны как для воздушной, так и для водяной среды. Следовательно, опытные данные, полученные в ходе эксперимента, могут быть применены при анализе течения теплоносителя в штатной топливной кассете. Все измерения фиксировались при среднерасходной скорости воздушной рабочей среды на входе в ЭМ 31.1–32.6 м/с и числах Рейнольдса $Re = 76000–79000$.

Первичная зона автомодельного течения воздушного потока определялась экспериментально на основе построения зависимостей:

сопротивления трения пучка гладких труб от числа Рейнольдса;

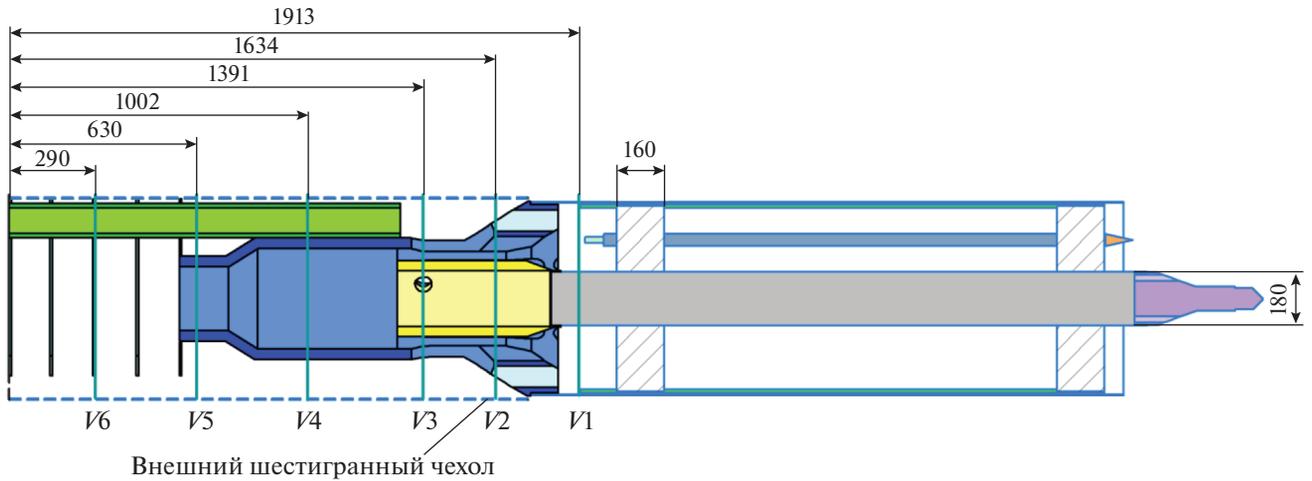


Рис. 4. Схема расположения сечений измерений

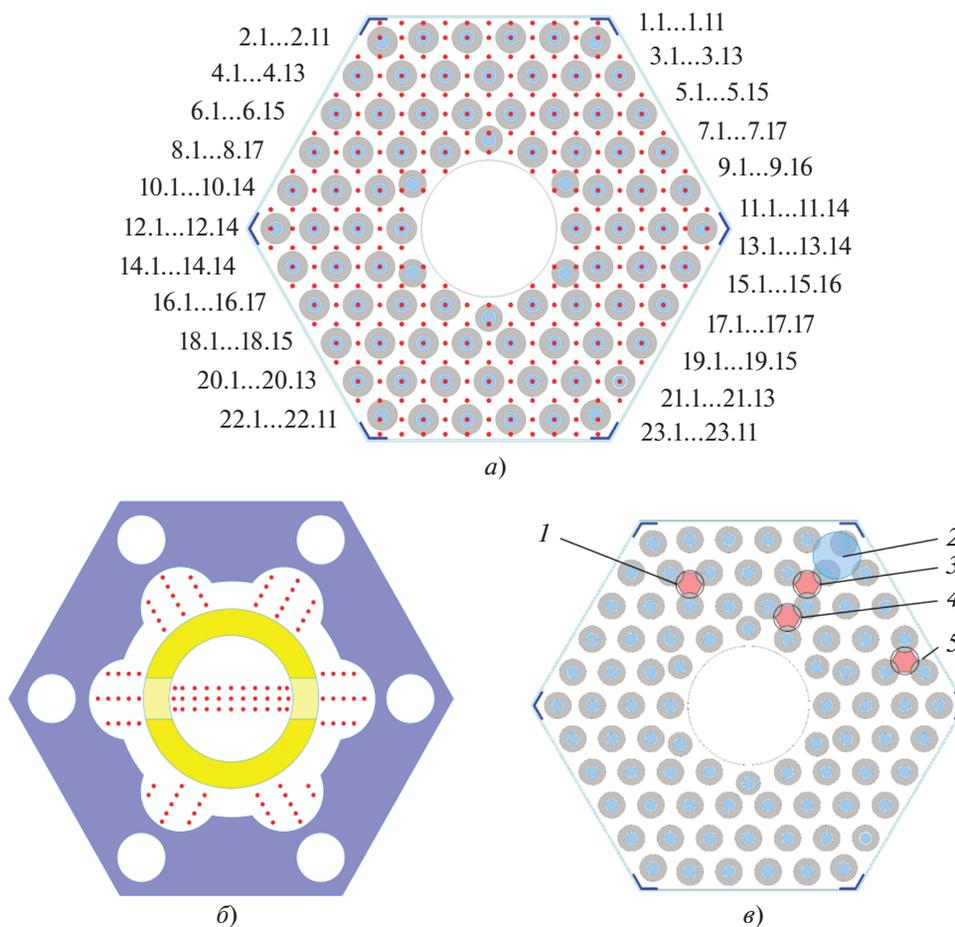


Рис. 5. Примеры расположения точек измерения на выходе из пучка твэлов (а), сливных окон головки (б) и ячеек впрыска контрастной примеси (в).

1 – регулярная ячейка в противоположной относительно входного сечения трубы отбора теплоносителя части твэльного пучка; 2 – входное сечение трубы отбора; 3 – регулярная ячейка вблизи входного сечения трубы отбора теплоносителя; 4 – ячейка центрального вытеснителя; 5 – ячейка, расположенная в углу топливной кассеты

коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) дистанционирующей решетки от числа Рейнольдса.

Анализ указанных зависимостей показывает, что начиная с определенного значения числа Рейнольдса сопротивление трения пучка гладких труб и КГС дистанционирующей решетки перестает существенно меняться. Это свидетельствует о начале зоны автомодельного течения воздушного потока. При проведении экспериментов зона автомодельного течения воздушного потока возникала в диапазоне чисел Рейнольдса от 45000 до 50000.

В качестве характерного масштаба зоны автомодельного течения воздушного потока была выбрана скорость потока на входе в канал экспериментальной модели.

Число Рейнольдса вычисляли по формуле

$$Re = (wd_r)/\nu,$$

где w – характерная скорость воздушного потока, м/с; d_r – гидравлический диаметр твэльного пучка экспериментальной модели, м; ν – кинематический коэффициент вязкости среды, м²/с.

Гидравлический диаметр определяли только для пучка твэлов-имитаторов, расположенных в чехле экспериментальной модели, при этом локальные изменения геометрических характеристик пучка твэлов-имитаторов, обусловленные наличием дистанционирующих решеток, не учитывались.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ результатов исследований распределения аксиальной скорости и расхода потока теплоносителя в выходной части ТВС с использованием пневмометрического метода позволил сделать следующие выводы.

На выходе из твэльного пучка аксиальное течение теплоносителя приобретает ярко выраженную неоднородность, что обусловлено конструктивными особенностями топливных кассет. Расположение локальных минимумов аксиальной скорости на выходе из пучка твэлов топливных кассет обеих конструкций аналогично. Наименьшие значения аксиальной скорости потока наблюдаются на периферии у поверхности чехла, а также возле поверхности трубы центрального вытеснителя. Безразмерная аксиальная скорость потока в локальных минимумах составляет 0.1–0.4.

Местоположение локальных максимумов аксиальной скорости потока на выходе из пучка твэлов зависит от формы конфузора и числа сливных окон в головке. Перед головкой с асимметричным расположением сливных окон локальные максимумы аксиальной скорости распределяются неоднородно, но преимущественно в области, занимаемой конфузуром, а безразмерная аксиальная

скорость потока составляет от 0.8 до 1.0 (рис. 6, а). Перед головкой с симметричным расположением сливных окон максимумы аксиальной скорости распределяются однородно в области, занимаемой проходным сечением конфузора, а безразмерная аксиальная скорость потока лежит в диапазоне 0.8–0.9 (рис. 6, б).

Наличие шести сливных отверстий в головках топливных кассет обоих типов не привело к появлению максимумов аксиальной скорости потока перед ними. Это может быть обусловлено малой площадью их проходного сечения относительно проходного сечения конфузора.

На выходе из головок обоих типов структуры течения аксиального потока теплоносителя практически не различаются. Так, на выходе из головки с тремя сливными окнами наибольшие значения аксиальной скорости потока (1.7–1.9) наблюдаются непосредственно вблизи окон. На выходе из шести сливных отверстий аксиальная скорость потока ниже, ее значение находится в диапазоне 1.4–1.6. Таким образом, за головкой с тремя сливными окнами течение потока теплоносителя приобретает существенную неоднородность (рис. 7, а).

На выходе из головки с шестью сливными окнами наибольшие значения безразмерной аксиальной скорости потока (от 1.4 до 1.6) наблюдаются непосредственно в районе окон. На выходе из шести сливных отверстий безразмерная аксиальная скорость потока составляет 1.3–1.5. Течение потока теплоносителя более однородно за головкой с шестью сливными окнами, чем за головкой с тремя сливными окнами (рис. 7, б).

Такое различие в структуре аксиального течения потока теплоносителя обусловлено симметричностью и асимметричностью взаимного расположения сливных окон и отверстий в головках разных типов.

Перед верхней опорной плитой в широкой части головки отмечена значительная неоднородность аксиальной скорости потока теплоносителя, характерная для головок и с тремя, и с шестью сливными окнами.

За головкой с тремя сливными окнами локальные минимумы и максимумы аксиальной скорости потока локализованы в диаметрально разных областях выходного участка топливной кассеты, что может быть вызвано закруткой потока теплоносителя после его выхода из сливных окон. Минимальные значения безразмерной аксиальной скорости составляют 0.3–0.7, а максимальные – от 0.9 до 1.3. Распределение безразмерной аксиальной скорости за головкой с тремя сливными окнами показано на рис. 8, а.

За головкой с шестью сливными окнами минимальные значения аксиальной скорости потока зафиксированы в областях, в которых поток одновременно попадает из сливных окон и отвер-

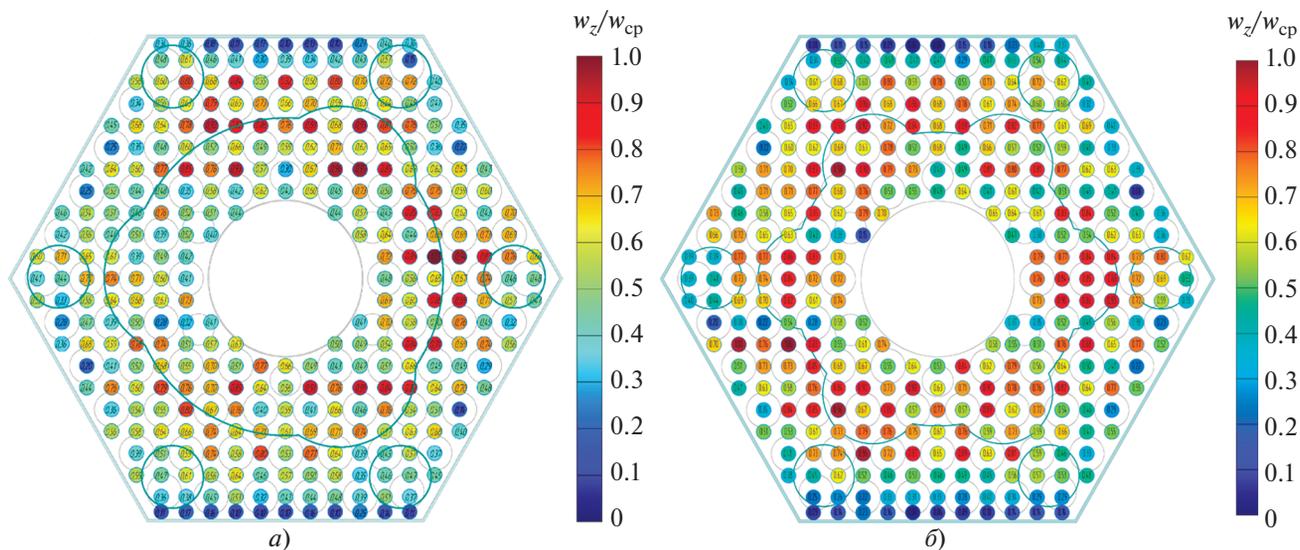


Рис. 6. Аксиальная скорость потока на выходе из пучка твэлов на выходном участке топливной кассеты РУ атомного ледокола (а) и АСММ (б).

w_z — аксиальная скорость потока в точке измерения; w_{cp} — среднерасходная скорость на входе в экспериментальную модель

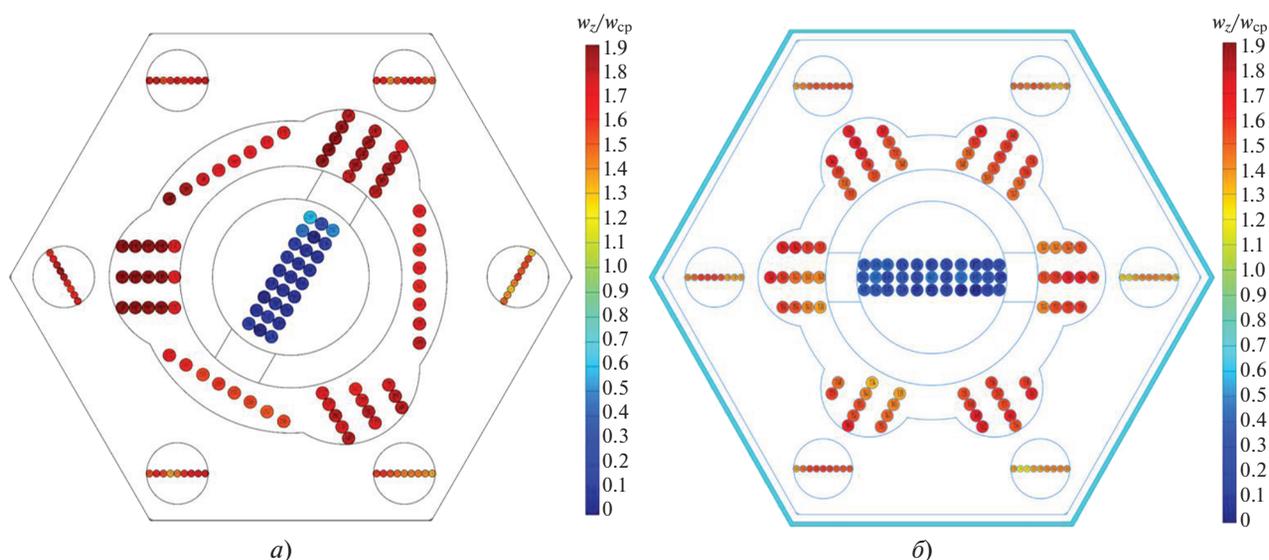


Рис. 7. Аксиальная скорость потока на выходе из головки на выходном участке топливной кассеты РУ атомного ледокола (а) и АСММ (б).

Обозначения см. рис. 6

стей. Безразмерная аксиальная скорость потока в данных областях имеет значения 0.5–0.7. Такое расположение зон с низкой аксиальной скоростью обусловлено слиянием двух потоков теплоносителя: аксиального, выходящего из сливных отверстий, и радиального, направляющегося из сливных окон и снижающего аксиальную скорость потока. Распределение аксиальной скорости

сти за головкой с шестью сливными окнами приведено на рис. 8, б.

В узкой части головки, перед входом теплоносителя в сливные отверстия верхней опорной плиты, зоны низкой аксиальной скорости потока находятся у поверхности головки и возле трубы отбора теплоносителя, безразмерная аксиальная скорость потока составляет 0.2–0.6 (рис. 9).

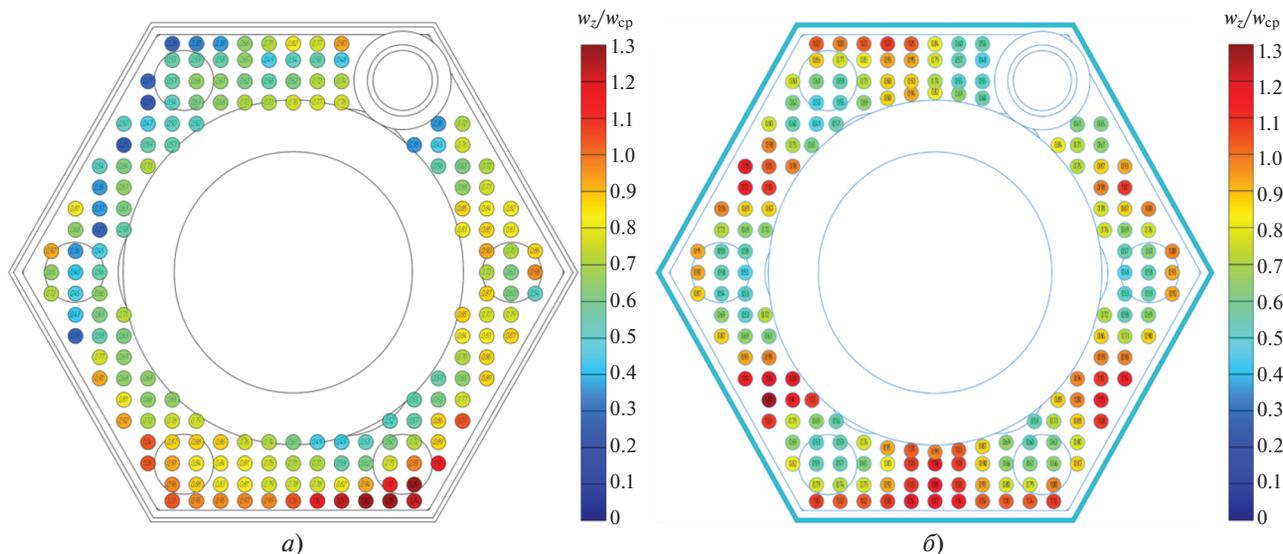


Рис. 8. Аксиальная скорость потока в области между головкой и верхней опорной плитой в широкой части головки ТВС на выходном участке топливной кассеты РУ атомного ледокола (а) и АСММ (б). Обозначения см. рис. 6

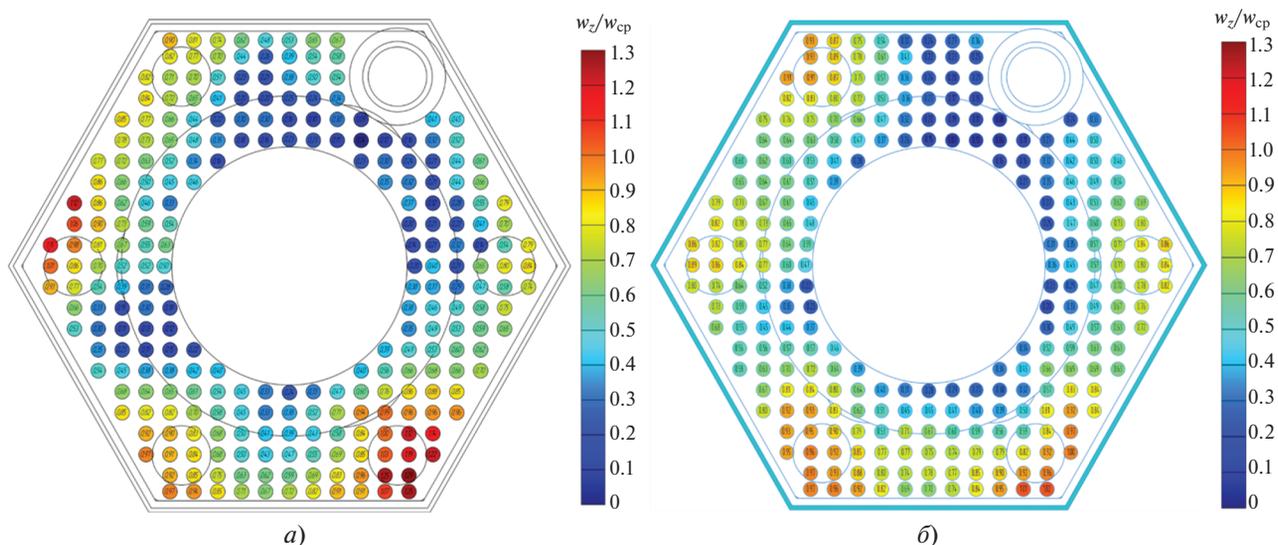


Рис. 9. Аксиальная скорость потока в области между головкой и верхней опорной плитой в узкой части головки ТВС на выходном участке топливной кассеты РУ атомного ледокола (а) и АСММ (б). Обозначения см. рис. 6

Структура и размеры зон с низкой аксиальной скоростью потока за головками с тремя и шестью сливными окнами аналогичны.

Зоны с высокими аксиальными скоростями потока расположены перед сливными окнами верхней опорной плиты, и их локализация идентична для головок обоих типов. Безразмерная аксиальная скорость потока в выделенных областях за головкой с тремя сливными окнами составляет

0.8–1.3, а за головкой с шестью сливными окнами — от 0.8 до 1.0 (см. рис. 9). Таким образом, симметричность конструкции головки с шестью сливными окнами обеспечивает бóльшую равномерность поля аксиальной скорости потока на выходе из нее.

Рассмотренная картина распределения аксиальных скоростей потока в данной области обусловлена влиянием нескольких факторов, а именно конструкцией верхней опорной плиты,

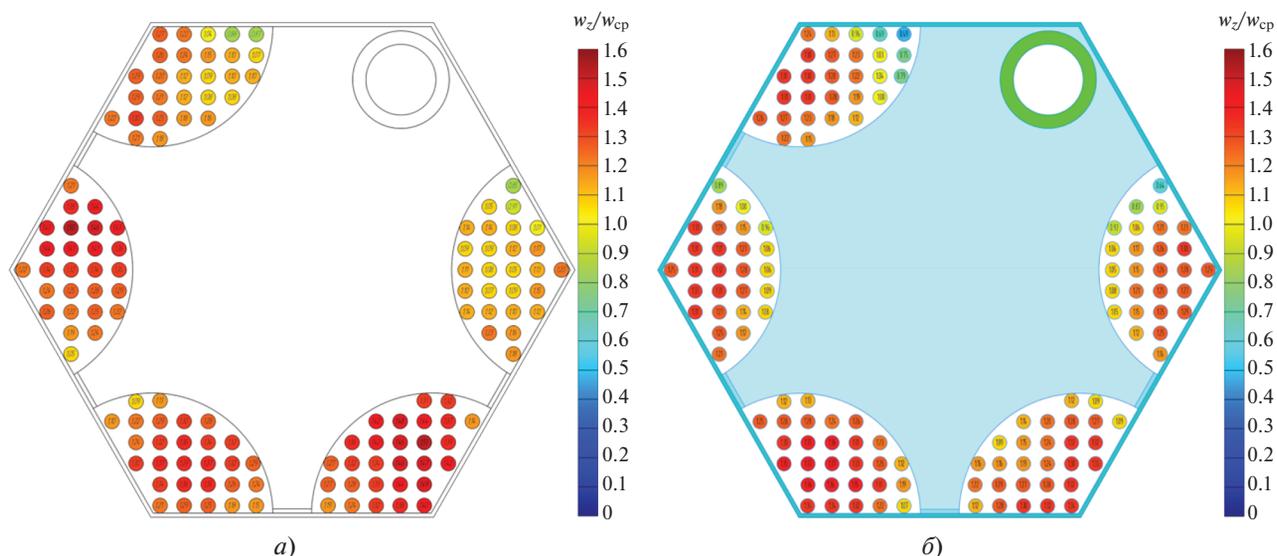


Рис. 10. Аксиальная скорость потока в сливных отверстиях верхней опорной плиты на выходном участке топливной кассеты РУ атомного ледокола (а) и АСММ (б). Обозначения см. рис. 6

количеством сливных окон в головке и интенсивностью аксиального течения теплоносителя из шести сливных отверстий.

На выходе из пяти сливных отверстий верхней опорной плиты аксиальный поток теплоносителя распределился неравномерно из-за отсутствия одного сливного окна, на месте которого установлена труба отбора теплоносителя к ТСП, а также наличия зон с низкой аксиальной скоростью потока возле трубы отбора теплоносителя и у поверхности головки (см. рис. 8, 9). В сливных окнах, удаленных от трубы отбора теплоносителя, аксиальная скорость потока выше, чем в окнах, расположенных возле трубы отбора, это характерно для головок обоих типов. В сливных окнах, удаленных от трубы отбора теплоносителя, за головкой с тремя сливными окнами значения безразмерной аксиальной скорости составляют 1.0–1.6, а за головкой с шестью сливными окнами – от 0.9 до 1.3. В сливных окнах, находящихся возле трубы отбора теплоносителя, за головкой с тремя сливными окнами аксиальная скорость

равняется 0.9–1.3, а за головкой с шестью сливными окнами составляет 0.5–1.3 (рис. 10).

Распределение аксиального расхода теплоносителя на выходе из головок топливной кассеты с тремя и шестью сливными окнами приведено в таблице.

Представленное распределение аксиального расхода теплоносителя свидетельствует о том, что на выходе из головки с шестью сливными окнами поток теплоносителя распределяется более равномерно, чем за головкой с тремя сливными окнами.

Анализ гидродинамической картины течения теплоносителя в выходном участке топливной кассеты с головками двух типов, полученной методом инъекции контрастной примеси, позволил сделать следующие выводы.

На выходе из пучка твэлов процесс перемешивания теплоносителя имеет низкую интенсивность. Это подтверждается малой областью размытия контрастной примеси по поперечному сечению. Независимо от расположения ячейки подачи примеси в поперечном сечении и конструкции головки топливной кассеты область размытия контраст-

Аксиальный расход теплоносителя на выходе из головки топливной кассеты относительно общего расхода через топливную кассету

Количество сливных окон	Аксиальный расход теплоносителя, %		
	на выходе из каждого сливного отверстия	через каждое сливное окно	через втулку центрального вытеснителя
Три	3.7–4.5	24.3–26.0	2.8
Шесть	4.0–4.5	11.2–12.0	4.5

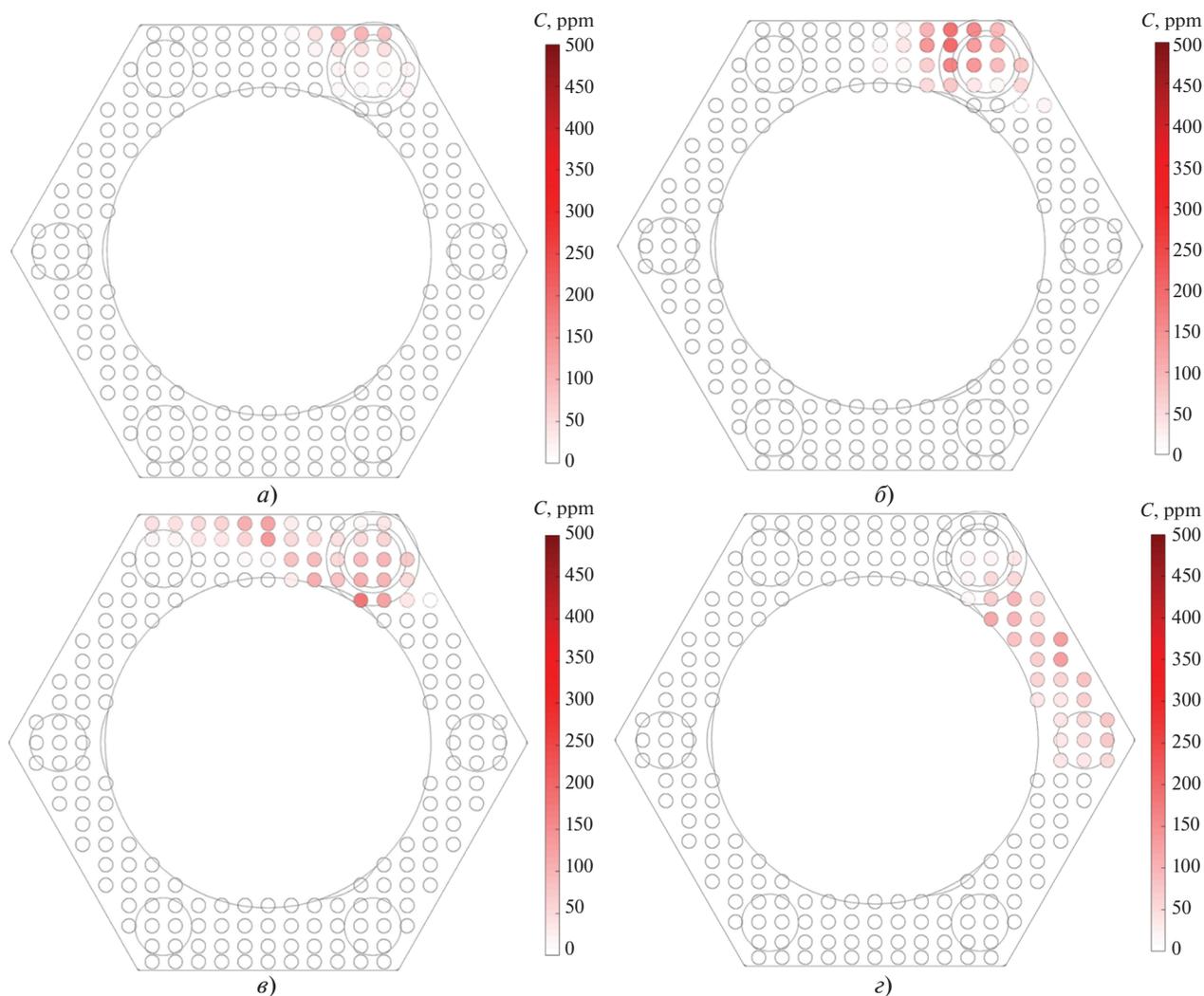


Рис. 11. Распределение контрастной примеси (C , ppm) перед трубой отбора теплоносителя в выходном участке топливной кассеты РУ атомного ледокола.

Подача примеси: *a* – в регулярную ячейку, расположенную напротив трубы отбора; *b* – в ячейку возле трубы центрального вытеснителя; *c* – в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора; *d* – в ячейку, расположенную в углу топливной кассеты

ной примеси охватывает ячейку впрыска, а также одну или две соседние с ней ячейки. Концентрация контрастной примеси в ячейках подачи находится в диапазоне 2000–2400 ppm. Также на выходе из пучка твэлов наблюдается процесс смещения областей растекания контрастной примеси к центру модели, что может быть обусловлено особенностями входа потока теплоносителя в конфузор головки топливной кассеты.

При определении областей пучка твэлов, из которых потоки теплоносителя будут попадать в трубу отбора к ТСП, было выявлено следующее:

за головкой с тремя сливными окнами из всех рассматриваемых ячеек подачи примесь попала в трубу отбора теплоносителя, что подтверждается картограммами распространения примеси на

входе в трубу отбора, концентрация примеси составляла 150–250 ppm (рис. 11);

за головкой с шестью сливными окнами примесь попадала в трубу отбора теплоносителя только из регулярной ячейки, расположенной напротив трубы, и из ячейки возле центрального вытеснителя, что подтверждается картограммами распространения контрастной примеси на входе в трубу отбора, концентрация примеси была 150–300 ppm (рис. 12).

Распределение контрастной примеси в области между головкой и верхней опорной плитой показывает, что перемешивание теплоносителя за головкой с тремя сливными окнами осуществляется более интенсивно, чем за головкой с шестью сливными окнами. Это связано с асимметричностью аксиального течения теплоносителя

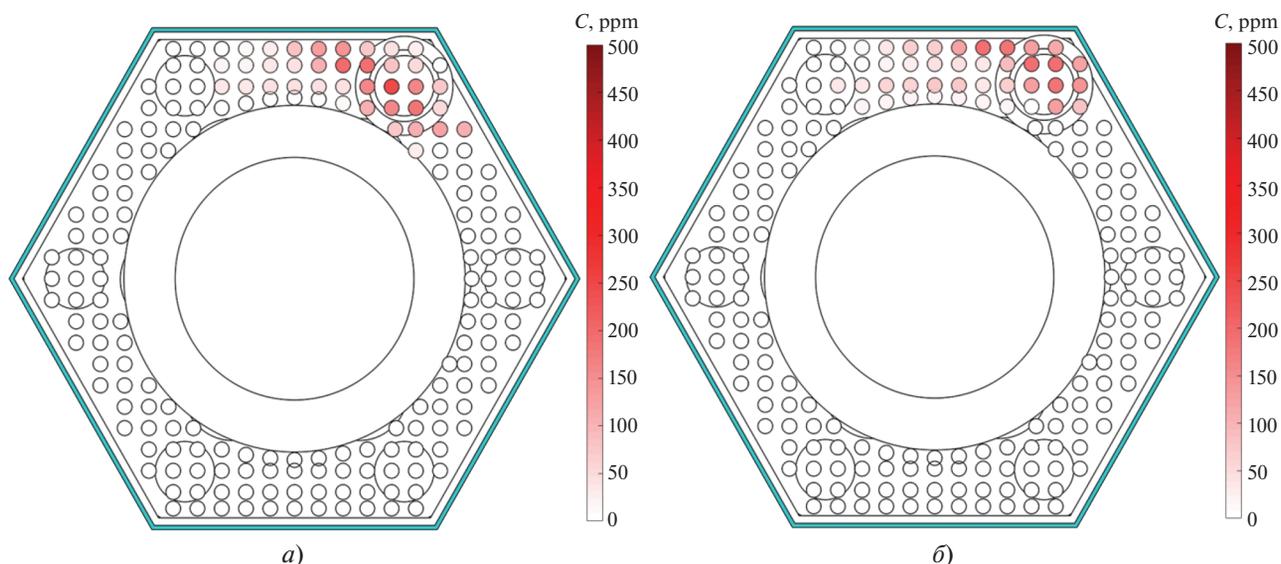


Рис. 12. Распределение контрастной примеси (C , ppm) перед трубой отбора теплоносителя в выходном участке топливной кассеты РУ АСММ.

Подача примеси: a – в регулярную ячейку, расположенную напротив трубы отбора; b – в ячейку возле трубы центрального вытеснителя

на выходе из головки с тремя сливными окнами, что обусловлено несимметричным расположением сливных окон и отверстий и, как следствие, несимметричностью распределения радиальных и аксиальных потоков теплоносителя. В свою очередь, меньшая интенсивность перемешивания теплоносителя за головкой с шестью сливными окнами возникает из-за симметричности распределения аксиальных и радиальных потоков на выходе из сливных отверстий и окон.

ВЫВОДЫ

1. В результате экспериментальных исследований выявлено, что процесс перемешивания потока наиболее интенсивен за головкой с тремя сливными окнами и шестью сливными отверстиями, что обусловлено неоднородным распределением аксиальных и радиальных потоков теплоносителя, выходящих из окон и отверстий. Аксиальная скорость потока на выходе из окон и отверстий составила 1.7–1.9 и 1.4–1.6 соответственно.

2. Отмечено, что за головкой с симметричным расположением шести сливных окон и отверстий наблюдается наименьшее количество зон с низкими аксиальными скоростями потока, что оказывает значительное влияние на перемешивание теплоносителя и, как следствие, на точность показаний термометра сопротивления. Аксиальная скорость потока на выходе из окон и отверстий составила 1.4–1.6 и 1.3–1.5 соответственно.

3. Для интенсификации процесса перемешивания теплоносителя возможно убрать из кон-

струкции головки шесть сливных отверстий, сохранив шесть сливных окон. Такое техническое решение позволит интенсифицировать перемешивание теплоносителя благодаря усилению радиальных потоков на выходе из сливных окон путем исключения аксиального течения теплоносителя из сливных отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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>
2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **Методические вопросы и некоторые результаты экспериментальных и расчетных исследований критических тепловых потоков в ТВС реактора РИТМ-200 для АСММ** / А.А. Захарычев, Г.Ш. Ик-

- санова, А.В. Куприянов, А.Б. Осин, В.В. Петрунин, О.Б. Самойлов, Д.Л. Шипов // Атомная энергия. 2021. Т. 130. Вып. 2. С. 63–68.
6. **Методы** обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов / А.А. Баринов, С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов, О.Б. Самойлов // Атомная энергия. 2016. Т. 120. Вып. 5. С. 270–275.
7. **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. Про-
нин, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // ИФЖ. 2017. Т. 90. № 4. С. 988–996.
8. **Экспериментальные** исследования локальной гидродинамики теплоносителя на масштабной модели кассетной ТВС реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев, А.А. Баринов, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 41–48.
<https://doi.org/10.1134/S004036361608004X>
9. **Гухман А.А.** Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973.

Hydrodynamics of the Coolant in the Outlet Section of a Fuel Cartridge with Heads of Different Designs of the Reactor Core RITM of a Low-Power Nuclear Plant

S. M. Dmitriev^a, T. D. Demkina^a, A. A. Dobrov^a, D. V. Doronkov^{a, *}, D. S. Doronkova^a,
M. A. Legchanov^a, A. N. Pronin^a, A. V. Ryazanov^a, D. N. Solntsev^a, and A. E. Khrobostov^a

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

**e-mail: nevid000@mail.ru*

Abstract—The results of experimental studies and a comparative analysis of the coolant hydrodynamics in the outlet section of the fuel cartridge behind heads of different designs are presented. The considered fuel assemblies are designed for installation in the core of a RITM-type reactor of a small ground-based nuclear power plant. The aim of the work was to study the distribution of the axial velocity and flow rate of the coolant at the outlet of the fuel bundle, behind the heads of different designs, and in front of the coolant extraction pipe and in the holes of the upper base plate as well as to determine the areas of the fuel bundle from which the coolant flow is most likely to enter the sampling pipe and, accordingly, to the resistance thermometer installed in this pipe. The experiments were carried out on a research aerodynamic stand with an air working medium on a model of the outlet section of the fuel cartridge, which includes a fragment of the outlet part of the fuel bundle with spacer grids, dummies of two types of heads, an upper support plate, and a coolant extraction pipe. When studying the coolant flow rate in the outlet part of the fuel cartridge, the pneumometric method and the method of contrast impurity injection were used. The measurements were carried out over the entire cross section of the model. The hydrodynamic picture of the coolant flow is represented by cartograms of the distribution of axial velocity, coolant flow rate, and contrast impurities in the cross section of the model. The results of the research were used by specialists from the design and calculation departments of Afrikantov OKBM to justify engineering solutions in the design of new cores of RITM reactors. The results of the experiments were compiled into a database and used in the validation of the LOGOS CFD program developed by the employees of RFNC-VNIIEF and ITMP Moscow State University as analogues to foreign programs of the same class, which include ANSYS, Star CCM+, etc. Experimental data are also used to validate one-dimensional thermal-hydraulic codes used in Afrikantov OKBM when substantiating the thermal reliability of the cores of reactor installations; the thermal-hydraulic code KANAL also belongs to this class of programs.

Keywords: fuel cartridge, head, fuel element, central displacer, drain windows, drain holes, base plate, extraction pipe, coolant hydrodynamics, flow mixing