

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВЫХОДНОМ УЧАСТКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ КАССЕТНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ТИПА РИТМ¹

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

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

*e-mail: nevid000@mail.ru

Поступила в редакцию 11.12.2022 г.

После доработки 20.02.2023 г.

Принята к публикации 25.02.2023 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики теплоносителя на выходном участке кассетной тепловыделяющей сборки (ТВС) реактора типа РИТМ атомной электростанции малой мощности наземного размещения. Цель работы – анализ распределения осевой скорости и расхода потока теплоносителя на выходе из пучка твэлов, в модернизированной головке тепловыделяющей сборки, возле трубы отбора теплоносителя и отверстиях верхней опорной плиты, а также определение тех областей пучка твэлов, из которых наиболее вероятно попадание потока теплоносителя в трубу отбора к термометру сопротивления. Для достижения этой цели проведены эксперименты на исследовательском стенде с воздушной рабочей средой на модели выходного участка тепловыделяющей кассеты, включающей в себя выходной фрагмент пучка твэлов с дистанционирующими решетками, макеты модернизированной головки топливной кассеты, верхней опорной плиты и трубы отбора теплоносителя. При изучении течения потока теплоносителя в выходной части топливной кассеты применялись пневмометрический метод и метод впрыска контрастной примеси. В качестве исследуемой была выбрана область, охватывающая все поперечное сечение модели. Картина течения теплоносителя представлена картограммами распределения его осевой скорости и расхода, а также картограммами распределения контрастной примеси в поперечном сечении экспериментальной модели. Результаты экспериментов могут служить основой для принятия инженерных решений при проектировании новых активных зон реакторов типа РИТМ. Полученная база опытных данных может быть использована для валидации современных CFD-программ и одномерных теплогидравлических кодов, применяемых при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, топливная кассета, твэл, дистанционирующая решетка, модернизированная головка, труба отбора теплоносителя, осевая скорость, осевой расход, контрастная примесь, исследовательский стенд, экспериментальная модель

DOI: 10.56304/S0040363623070019

В настоящее время ведется разработка проекта инновационной АЭС малой мощности на базе модернизированных судовых реакторных установок типа РИТМ, в которых современные технологии судовой ядерной энергетики получили дальнейшее развитие [1, 2].

Активная зона модернизированного реактора типа РИТМ атомной станции малой мощности [3, 4] имеет несколько важных отличий от активной зоны своего судового прототипа: усовершенствована форма головок тепловыделяющих сборок и увеличено число областей контроля темпе-

ратурного состояния теплоносителя на выходе из активной зоны.

При модернизации конструкции головки ТВС были изменены профиль сливных окон для радиального выхода потока теплоносителя и их количество. В головке новой конструкции число сливных окон и отверстий одинаковое, равное шести.

Контроль температурного состояния теплоносителя на выходе из активной зоны осуществляется с помощью термометров сопротивления, заключенных в специально спроектированные трубы отбора теплоносителя. Эти трубы расположены напротив сливных окон и отверстий модернизированной головки ТВС. На показания термометра сопротивления может влиять неравномерность

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

структуры осевого течения потока на выходе из пучка твэлов и модернизированной головки ТВС, а также локальные горячие или холодные струи теплоносителя, образование которых вполне возможно. Это, в свою очередь, снижает точность определения температурного состояния теплоносителя на выходе из активной зоны, при том что точность и надежность контроля его температуры особенно важны при переходных режимах работы энергетической установки [5].

Таким образом, экспериментальное изучение гидродинамических процессов перемешивания теплоносителя на выходном участке ТВС с головкой новой конструкции и определение тех областей поперечного сечения пучка твэлов, из которых поток теплоносителя попадает в трубу отбора к термометру сопротивления, является актуальной научной задачей. Ее решение поможет при обосновании конструкторских разработок при модернизации активных зон кассетного типа для атомных электростанций малой мощности наземного исполнения.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД

Моделирование течения теплоносителя на выходном участке ТВС кассетного типа проводилось на исследовательском аэродинамическом стенде [6, 7] в НГТУ им Р.Е. Алексеева. Установка выполнена в виде разомкнутого контура с воздушной рабочей средой (рис. 1). Течение водного теплоносителя на выходном участке ТВС моделируется воздушным потоком на основе теории гидродинамического подобия [8].

Рабочие параметры научно-исследовательской установки таковы: рабочая среда – воздух, производительность вентилятора – 18540 м³/ч, полное давление в ресиверной емкости – 6 кПа.

Опыты осуществлялись на специально созданной экспериментальной модели (рис. 2), выполненной в виде шестигранного канала, геометрически повторяющего натурный выходной участок ТВС, в котором размещались следующие элементы:

пучок стержней двух типов диаметрами 40 и 36 мм, имитирующих твэлы и стержни выгорающего поглотителя соответственно;

макеты двух дистанционирующих решеток;

имитатор центрального вытеснителя цилиндрической формы диаметром 180 мм и имитатор его наконечника с отверстиями для протечки теплоносителя;

макет модернизированной головки ТВС, состоящий из двух частей (нижней с шестью сливными отверстиями и шестью сливными окнами и верхней без отверстий);

макет фрагмента верхней опорной плиты с сегментами пяти сливных отверстий и имитатором трубы отбора теплоносителя.

Все элементы экспериментальной модели увеличены на коэффициент геометрического подобия, равный 5.79, относительно натурального изделия.

Измерение осевой скорости потока в модели проводилось пневмометрическим методом [9] с использованием цифрового дифференциального манометра ДМЦ-01М с прямыми и Г-образными трубками Пито. Предел допускаемой основной погрешности измерений манометра ДМЦ-01М не превышал 5%.

Для изучения перемешивания теплоносителя за модернизированной головкой ТВС и выявления тех областей поперечного сечения пучка твэлов, из которых горячие или холодные струи теплоносителя могут попасть в трубу отбора, через специальные ячейки впрыскивали контрастную примесь (газ пропан). Оценить степень перемешивания теплоносителя можно по направлению и интенсивности растекания примеси в поперечном сечении.

Выбор такого метода определения степени перемешивания обусловлен следующими факторами:

необходимо детализировать течение потока из характерных областей поперечного сечения пучка твэлов в пространстве между входом в головку и входом во фрагмент верхней опорной плиты, что позволит локализовать области, из которых поток теплоносителя попадает в трубу отбора;

этот метод позволяет за довольно короткий промежуток времени получить большой объем высокоточных опытных данных, которые в дальнейшем упрощают построение графических зависимостей, картограмм и т.д.

Подача контрастной примеси производилась перед выходной дистанционирующей решеткой по ходу движения потока. Растекание примеси в объеме модели отслеживали с помощью прямых и Г-образных трубок Пито, подключенных к газоанализатору АДК-03Р. Концентрации примеси измеряли в диапазоне от 0 до 10000 ppm, погрешность измерения с учетом индивидуальной градуировки составляла ± 15 ppm (0–1000 ppm) и $\pm 1.5\%$ (1000–10000 ppm). Значение 10000 ppm соответствовало 1% (по объему) примеси в газозвушной смеси.

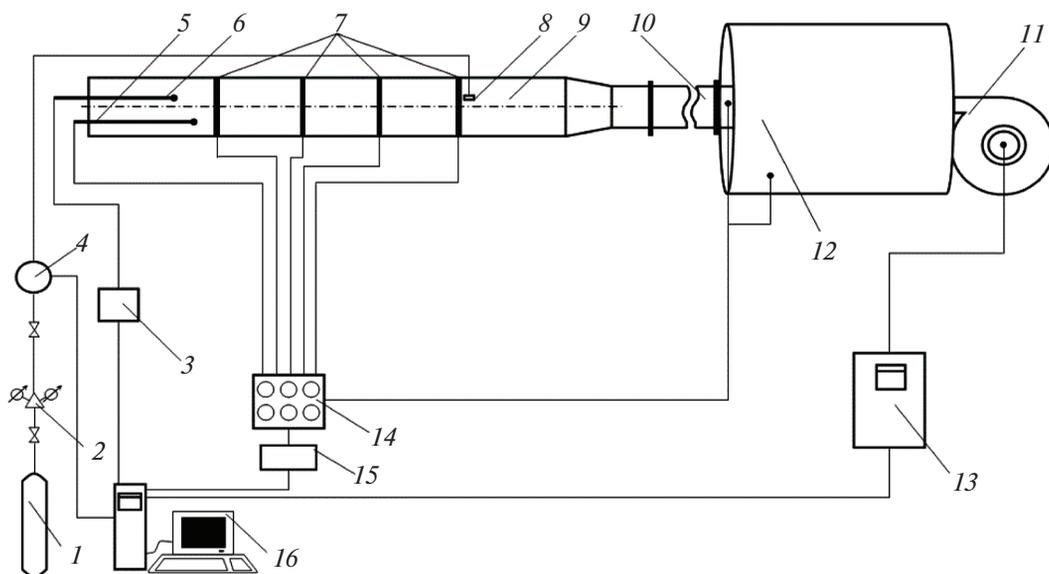
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование растекания контрастной примеси и осевой скорости потока осуществлялось в поперечных сечениях экспериментальной модели согласно схеме, приведенной на рис. 3.

Расположение точек измерения осевой скорости потока и контрастной примеси в поперечных сечениях экспериментальной модели показано на рис. 4.



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) исследовательского стенда.

1 – газовый баллон; 2 – редуктор; 3 – газоанализатор; 4 – пятиканальный пневмометрический датчик; 5 – измерительный имитатор твэлов; 6 – регулятор расхода газа; 7 – сечения отбора статического давления; 8 – устройство впрыска примеси; 9 – экспериментальные модели; 10 – успокоительный участок с расходомерным устройством; 11 – вентилятор; 12 – буферная емкость; 13 – преобразователь частоты; 14 – преобразователи давления САПФИР-22Р и ОВЕН ПД100И; 15 – станция регистрации данных Интеграф-1000; 16 – персональный компьютер

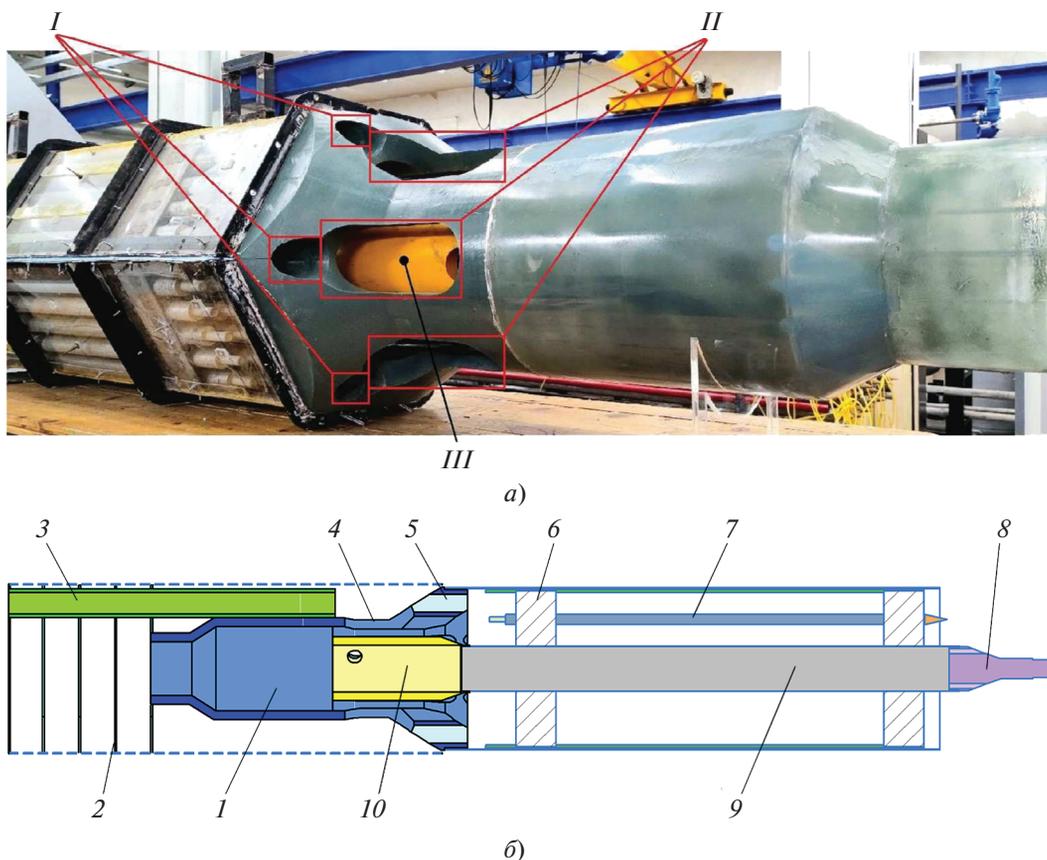


Рис. 2. Внешний вид (а) и конструкция (б) экспериментальной модели. *I, II* – соответственно сливные отверстия и сливные окна головки ТВС; *III* – втулка центрального вытеснителя. Макет: *1* – головки топливной кассеты, *2* – верхней опорной плиты, *3* – трубы отбора теплоносителя к термометру сопротивления; *4, 5* – сливные окна и отверстия; *6* – выходная дистанционирующая решетка; *7* – пучок имитаторов твэлов; *8, 9, 10* – наконечник, труба и втулка центрального вытеснителя

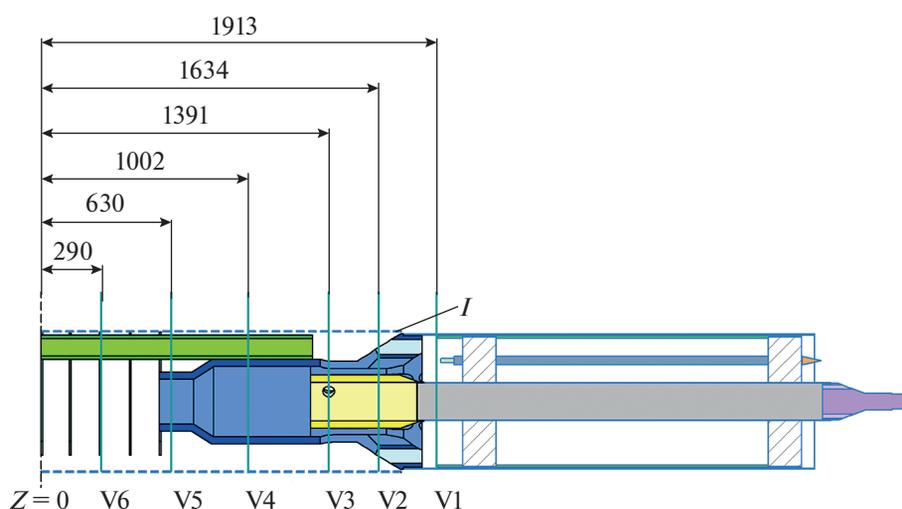


Рис. 3. Схема расположения сечений для проведения измерений. На выходе: *V1* – из пучка твэлов, *V2* – из сливных отверстий, *V3* – из сливных окон и отверстий втулки центрального вытеснителя; *V4* – в широкой части головки топливной кассеты; *V5* – в узкой части головки топливной кассеты; *V6* – в отверстиях макета фрагмента верхней опорной плиты. *I* – внешний шестигранный чехол

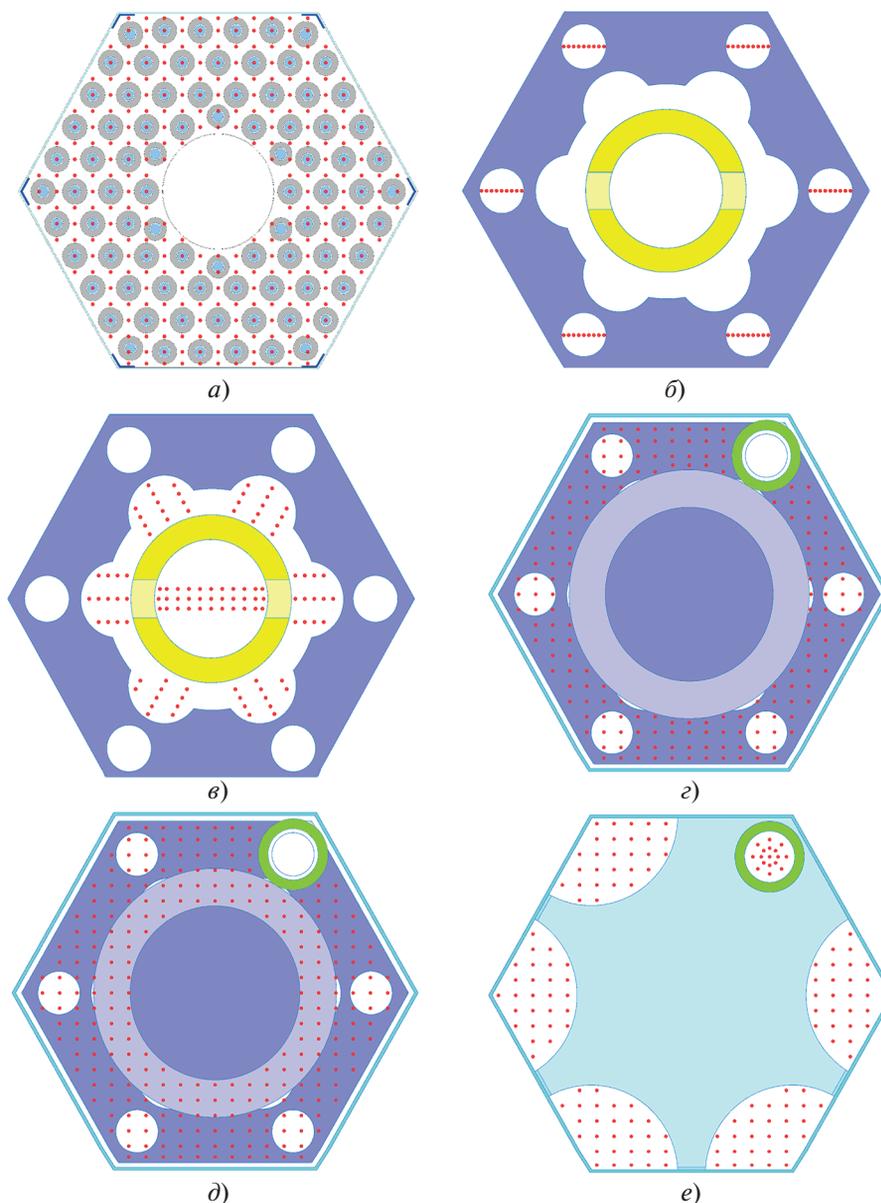


Рис. 4. Точки измерения осевой скорости потока и концентрации контрастной примеси. *a* – на выходе из пучка твэлов; *б* – в сливных отверстиях головки; *в* – в сливных окнах головки и втулках центрального вытеснителя; *г*, *д* – в области между головкой и верхней опорной плитой; *е* – в сливных окнах верхней опорной плиты и трубах отбора теплоносителя

Для выявления тех областей поперечного сечения пучка твэлов, из которых горячие или холодные струи теплоносителя могут попасть в трубу отбора, в пучке имитаторов твэлов были выделены следующие ячейки для впрыска контрастной примеси (рис. 5):

регулярные ячейки, расположенные как напротив трубы отбора теплоносителя, так и на удалении от нее;

ячейки, размещенные возле трубы центрального вытеснителя и на периферии пучка имитаторов твэлов, а также возле уголков жесткости.

Выбранные ячейки для впрыска контрастной примеси позволяют определить все основные области, из которых образовавшиеся холодные или горячие струи теплоносителя могут попасть в трубу отбора.

Для анализа течения теплоносителя на выходном участке ТВС использовали точечные картограммы распределения безразмерной осевой скорости и расхода потока теплоносителя, а также картограммы растекания примеси в поперечном сечении экспериментальной модели.

Безразмерные осевые скорости потока рабочей среды получены путем нормирования локального значения осевой скорости в точке проведения измерения на среднерасходную скорость воздушной рабочей среды на входе в экспериментальную модель.

Выбор точечных картограмм, а не картограмм, построенных с применением методов интерполяционных плоскостей, обусловлен небольшим количеством точек измерения аксиальной скорости потока и концентрации контрастной примеси. Это может привести к значительному искажению опытных данных, представленных в виде интерполяционных плоскостей.

Важный этап проведения экспериментов – подтверждение их представительности. Исследования гидродинамики теплоносителя в экспериментальной модели проводились в зоне автомодельного течения воздушного потока, т.е. в режиме движения рабочей среды в канале экспериментальной модели исследовательского стенда. Этот режим характеризуется неизменностью профиля безразмерной скорости потока как для водного теплоносителя реакторной установки, так и для воздушного потока в модели. Следовательно, на основе результатов экспериментов может быть проведен анализ гидродинамики водного теплоносителя в штатной активной зоне реактора типа РИТМ.

Начало зоны автомодельного течения воздушного потока можно определить экспериментально путем построения следующих зависимостей:

сопротивления трения пучка гладких труб от числа Рейнольдса (Re);

коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) дистанционирующих решеток, установленных в пучке имитаторов твэлов, от числа Рейнольдса.

Анализ этих зависимостей показывает, что начиная с некоторого числа Рейнольдса значения сопротивления трения пучка гладких труб и КГС дистанционирующих решеток перестают существенно изменяться. Такое явление характерно для начала зоны автомодельного течения воздушного потока. При проведении экспериментов эта зона начиналась при $Re = 50000-55000$. Все исследования выполнялись при $Re = 79000$ на участке стабилизированного течения потока.

В качестве характерного параметра зоны автомодельного течения воздушного потока можно принять его скорость. При постановке экспериментов характерной скоростью являлась осевая скорость потока воздушной рабочей среды на входе в канал экспериментальной модели. Ее среднерасходная скорость составляла 32.6 м/с.

Число Рейнольдса рассчитывали по формуле

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

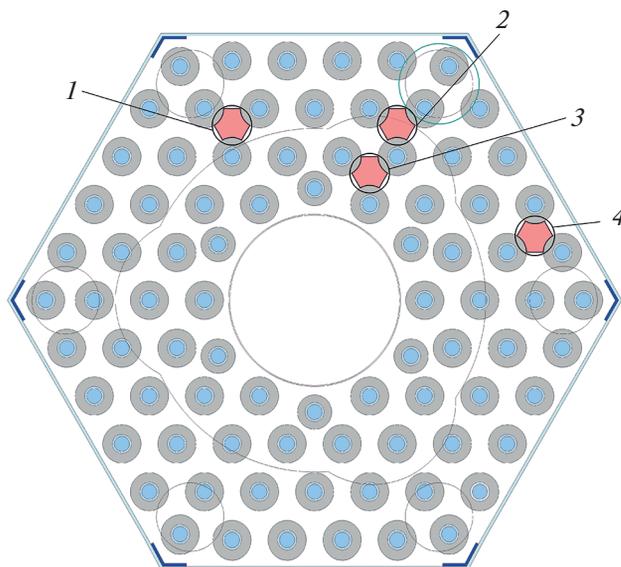


Рис. 5. Ячейки впрыска контрастной примеси в пучке имитаторов твэлов.

1 – регулярная ячейка, удаленная от трубы отбора теплоносителя; 2 – регулярная ячейка, расположенная вблизи трубы отбора теплоносителя; 3 – ячейка центрального вытеснителя; 4 – угловая ячейка

где V – скорость среды, м/с; d_r – гидравлический диаметр пучка твэлов экспериментальной модели, м; ν – кинематический коэффициент вязкости среды, m^2/c .

Гидравлический диаметр определяли только для пучка имитаторов твэлов, расположенных в чехле экспериментальной модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

1. На выходе из пучка твэлов наблюдается значительная неравномерность поля аксиальной скорости потока, обусловленная влиянием формы модернизированной головки (рис. 6). Минимальные значения безразмерной аксиальной скорости потока характерны для периферии ТВС (0.1–0.4). Это вызвано замедлением потока теплоносителя у стенок чехла тепловыделяющей сборки и входной части ее головки. В областях у центрального вытеснителя и перед торцевой частью головки безразмерные аксиальные скорости потока составляют 0.4–0.8. Такая картина течения потока объясняется его торможением перед торцевой частью головки и трением о поверхность трубы центрального вытеснителя. Локальные максимумы безразмерных аксиальных ско-

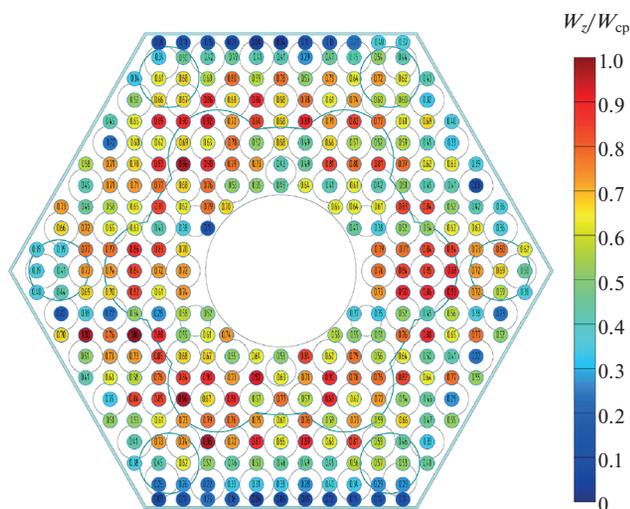


Рис. 6. Безразмерная осевая скорость потока W_z/W_{cp} на выходе из пучка ТВЭЛОВ ($W_{cp} = 32.6$ м/с, $Re = 79000$)

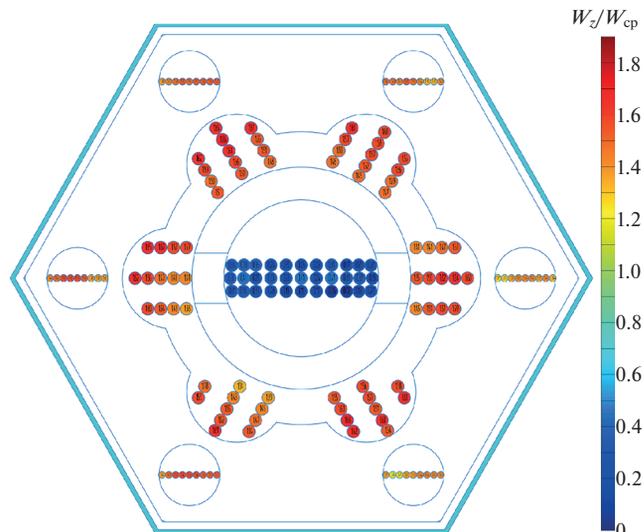


Рис. 7. Безразмерная осевая скорость потока W_z/W_{cp} на выходе из модернизированной головки ТВС ($W_{cp} = 32.6$ м/с, $Re = 79000$)

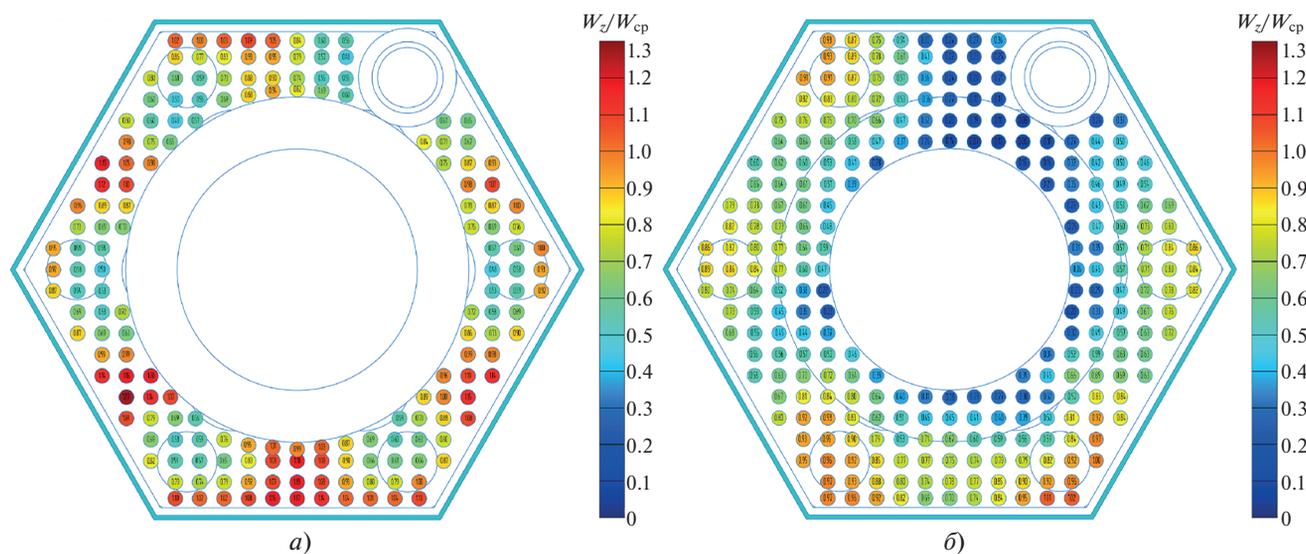


Рис. 8. Безразмерная осевая скорость потока W_z/W_{cp} в области между головкой ТВС и верхней опорной плитой ($W_{cp} = 32.6$ м/с, $Re = 79000$).
а, б – широкий и узкий участок верхней части модернизированной головки соответственно

ростей потока, равных 0.7–0.9, располагаются напротив шести сливных окон и шести сливных отверстий головки.

2. На выходе из шести сливных отверстий головки наблюдается однородное течение потока, характеризующееся равномерным профилем аксиальной скорости (рис. 7), значение которой находится в диапазоне 1.4–1.5. В шести сливных окнах головки оно равно 1.4–1.6. В областях сливных окон, прилежащих к поверхности трубы

центрального вытеснителя, безразмерная аксиальная скорость потока составляет 1.4, а в областях, расположенных напротив сливных отверстий, – 1.6. Такое распределение аксиальных скоростей потока в сливных окнах головки ТВС характерно для замедления потока у поверхности трубы центрального вытеснителя. Самые низкие аксиальные скорости потока на выходе из головки (0.1–0.4) наблюдаются внутри трубы центрального вытеснителя.

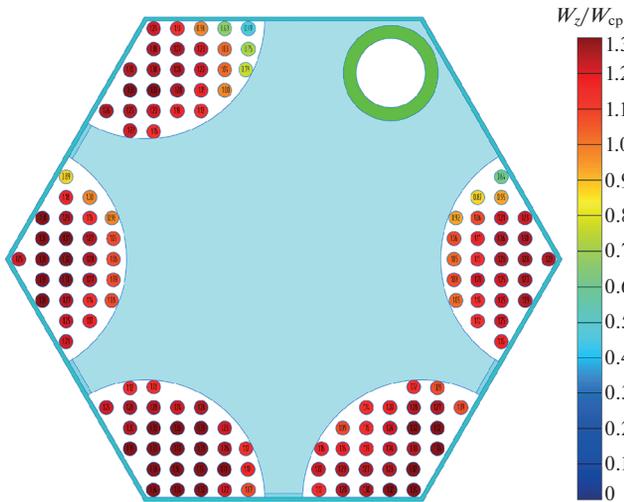


Рис. 9. Безразмерная осевая скорость потока W_z/W_{cp} в сегментах сливных отверстий верхней опорной плиты ($W_{cp} = 32.6$ м/с, $Re = 79000$)

3. В области между головкой ТВС и верхней опорной плитой выявлены следующие особенности течения потока:

за шестью сливными отверстиями в широкой части головки ТВС наблюдаются зоны с низкими значениями аксиальных скоростей потока (0.5–0.6), а в областях поперечного сечения, лежащих между шестью сливными отверстиями, – локальные максимумы аксиальной скорости потока, составляющие 0.8–1.2 (рис. 8, а). Такое распределе-

ние аксиальной скорости свидетельствует о возникновении в данной области поперечных течений теплоносителя, обусловленных преимущественно радиальным вытеканием потока теплоносителя из шести сливных окон головки;

в узкой части головки ТВС, удаленной от выходных сечений сливных окон и отверстий, наблюдается обратная картина течения потока: для областей поперечного сечения, лежащих за шестью сливными отверстиями головки, характерны зоны с относительно высокими безразмерными аксиальными скоростями, равными 0.7–0.9. В зонах, расположенных между сливными отверстиями, аксиальные скорости меньше и составляют 0.5–0.6 (рис. 8, б). Такое течение теплоносителя обусловлено отсутствием влияния на структуру потока радиальных течений из шести сливных окон головки;

в узкой части головки ТВС, удаленной от выходных сечений сливных окон и отверстий, происходит образование зоны низкой аксиальной скорости потока, значения которой лежат в диапазоне 0.1–0.4, из-за торможения осевого потока у поверхностей головки и трубы отбора теплоносителя (см. рис. 8, в).

4. В сегментах пяти сливных отверстий верхней опорной плиты наблюдается неравномерность аксиальной скорости потока, составляющей 0.4–1.4 (рис. 9). В двух сливных отверстиях, расположенных возле трубы отбора теплоносителя, имеются зоны с низкими значениями аксиальной скорости потока, соответствующими диа-

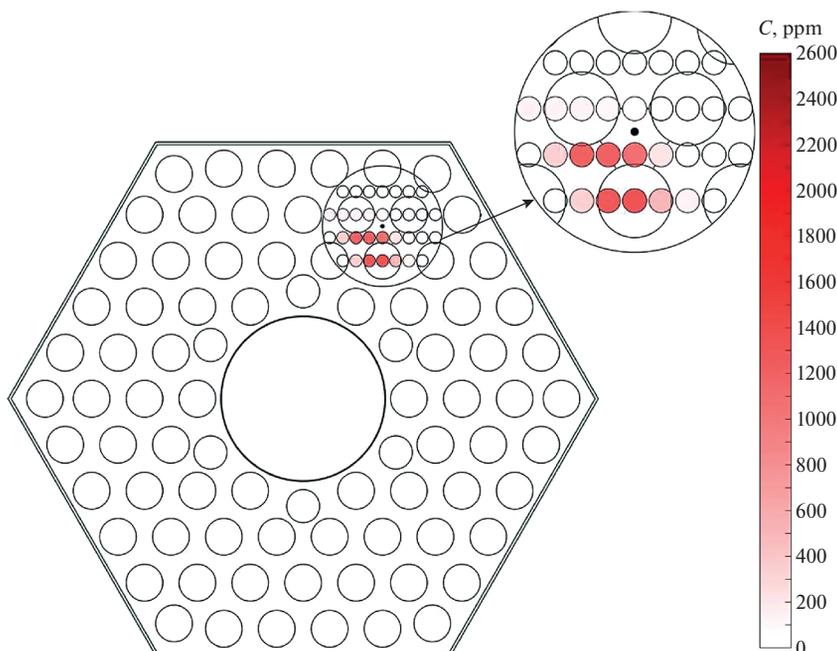


Рис. 10. Область растекания контрастной примеси в пучке твэлов при ее подаче в регулярную ячейку, расположенную напротив трубы отбора теплоносителя ($W_{cp} = 32.6$ м/с, $Re = 79000$)

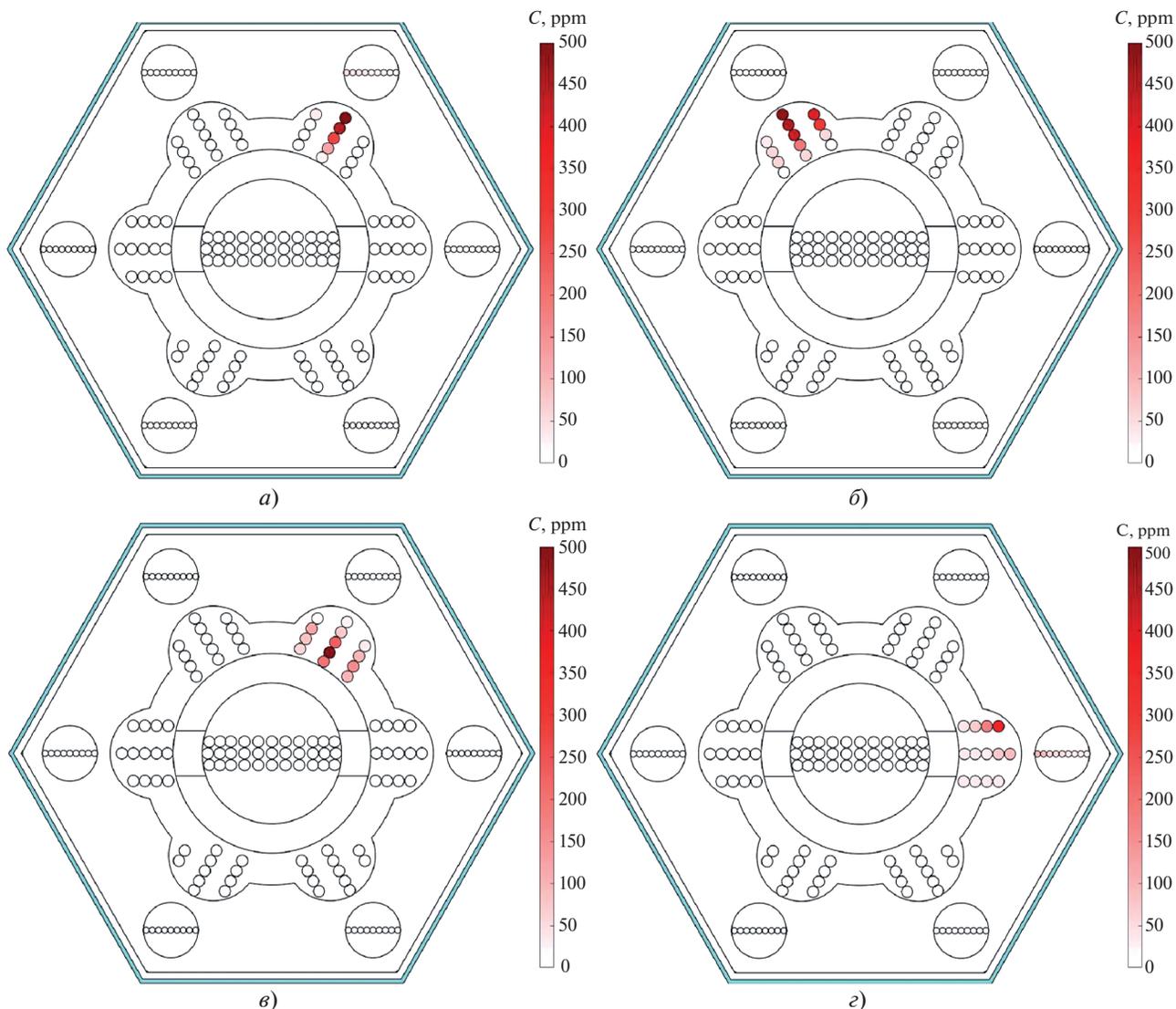


Рис. 11. Области растекания контрастной примеси на выходе из модернизированной головки ($W_{cp} = 32.6$ м/с, $Re = 79000$). Впрыск контрастной примеси: *a* – в регулярную ячейку, расположенную напротив трубы отбора теплоносителя; *б* – в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора теплоносителя; *в* – в ячейку около трубы центрального вытеснителя; *г* – в уголковую ячейку

пазону 0.4–0.8. Такое распределение аксиальной скорости потока обусловлено влиянием трубы отбора теплоносителя, которая вытесняет часть аксиального потока в соседние области, а также процессом торможения потока у поверхности этой трубы. В трех сливных отверстиях, удаленных от трубы отбора теплоносителя, поле аксиальной скорости потока однородно, а скорости равны 1.1–1.4. В самой трубе поле аксиальной скорости потока также однородно, ее значения находятся в диапазоне 0.50–0.75.

5. В выходном участке ТВС кассетного типа с модернизированной головкой аксиальный рас-

ход потока теплоносителя распределился следующим образом, %:

- Через каждое из шести сливных отверстий в среднем (равномерное распределение).....4.0–4.5
- Через втулку центрального теплоносителя.....4.5
- В конфузоре головки ТВС (равномерное распределение) через каждое из шести сливных окон.....11.0–12.0
- Через сливные отверстия.....18.5–20.5
- Через трубу отбора теплоносителя.....2.7

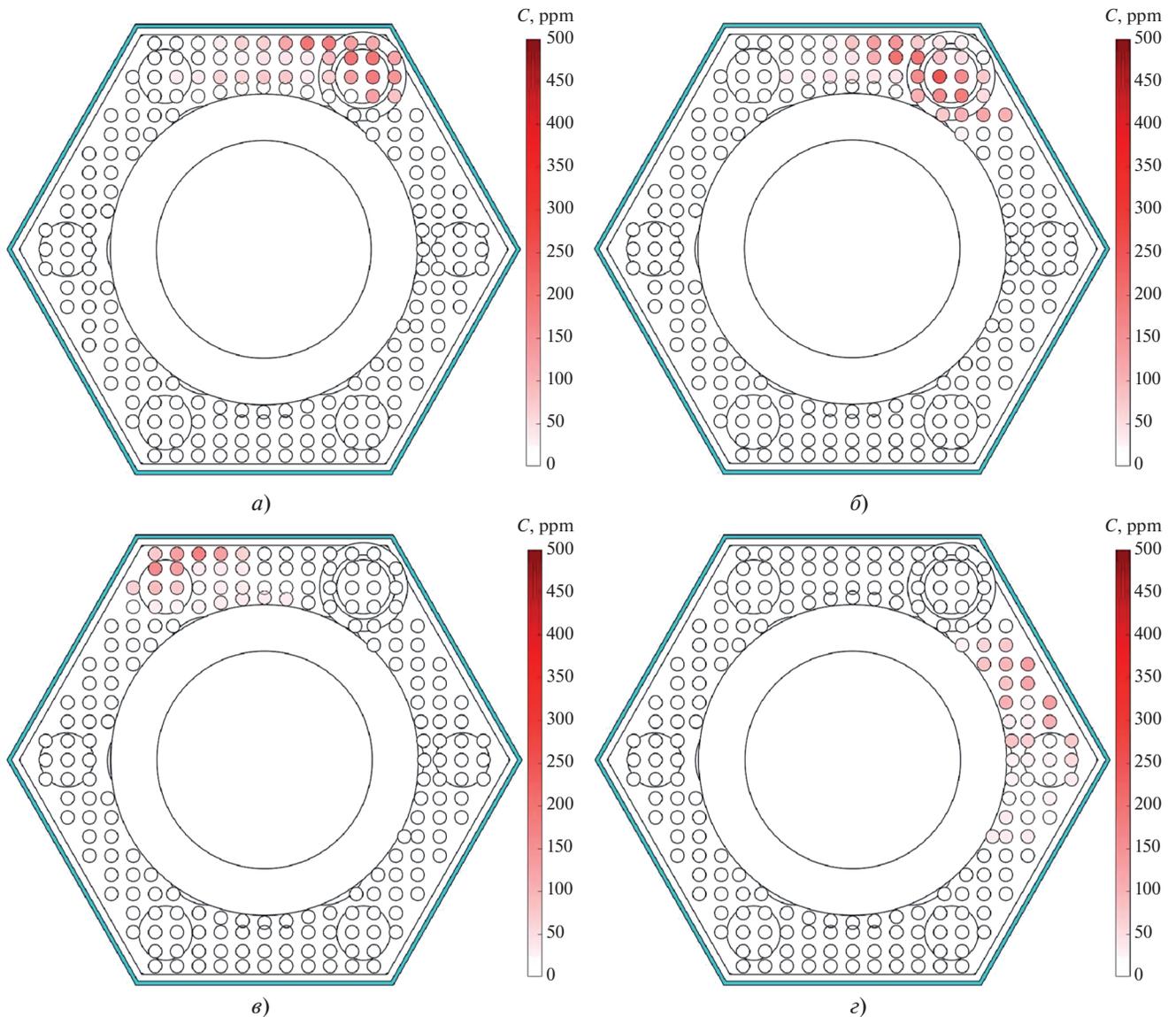


Рис. 12. Области растекания примеси перед трубой отбора теплоносителя ($W_{\text{ср}} = 32.6$ м/с, $Re = 79000$). Впрыск контрастной примеси: *а* – в регулярную ячейку, расположенную напротив трубы отбора теплоносителя; *б* – в ячейку, находящуюся около трубы центрального вытеснителя; *в* – в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора теплоносителя; *г* – в угловую ячейку

Анализ результатов экспериментальных исследований перемешивания теплоносителя методом инъекции контрастной примеси позволил детализировать картину течения теплоносителя на выходном участке топливной кассеты с модернизированной головкой. Были сделаны следующие выводы.

1. Независимо от расположения зоны подачи примеси в пучке твэлов перемешивание теплоносителя на выходе из него имеет низкую интенсивность. Происходит незначительное рассеяние примеси из ячейки подачи, ограниченное двумя рядами твэлов, а также смещение области с максимальной концентрацией примеси к центральной части сборки в область конфузора головки

(рис. 10). Концентрации примеси составляют 1900–2400 ppm. Впрыск примеси производился перед последней дистанционирующей решеткой по ходу движения воздушного потока, т.е. решетка не способствовала перемешиванию потока теплоносителя.

2. В сечении на выходе из сливных окон и отверстий модернизированной головки независимо от зоны подачи примесь попадает в ближайшие к ячейке подачи сливное окно и сливное отверстие. Максимальные концентрации примеси составляют 350–500 ppm (рис. 11). Такое распределение примеси в сливных окнах и отверстиях модернизированной головки свидетельствует о низкой интенсивности перемешивания теплоносителя в

области между выходом из пучка твэлов и входом в головку.

3. При подаче контрастной примеси в регулярную ячейку, близкую к трубе отбора теплоносителя, и ячейку, расположенную возле трубы центрального вытеснителя, примесь попадает в имитатор трубы отбора. Это приводит к тому, что наибольшие ее концентрации фиксируются непосредственно у входного сечения трубы отбора. Концентрации примеси в области локального максимума составляют 190–250 ppm. При подаче контрастной примеси в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора теплоносителя, и уголковую ячейку примесь не попадает в имитатор трубы отбора теплоносителя. Области локальных максимумов концентрации примеси находятся вдали от входного сечения трубы отбора теплоносителя и составляют 130–170 ppm (рис. 12).

4. В сегментах сливных отверстий опорной плиты примесь распространяется равномерно независимо от расположения ячейки подачи в пучке твэлов. Наибольшая концентрация примеси (55–100 ppm) наблюдается при ее подаче в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора теплоносителя, и в уголковую ячейку. Минимальная концентрация примеси, равная 10–60 ppm, соответствует ячейке подачи у центрального вытеснителя и регулярной ячейке, находящейся вблизи трубы отбора. Это объясняется тем, что значительная часть примеси попадает в трубу отбора теплоносителя. Распределение контрастной примеси в окнах верхней опорной плиты свидетельствует о наличии преимущественно аксиального течения потока, обусловленного формой сливных отверстий и окон модернизированной головки, что, в свою очередь, характерно для низкой интенсивности перемешивания теплоносителя в области между выходом из модернизированной головки ТВС и входом в верхнюю опорную плиту.

ВЫВОДЫ

1. Симметричное расположение сливных окон и отверстий головки позволяет получить однородное поле аксиальной скорости и аксиального расхода потока внутри головки. Зоны с низкими осевыми скоростями потока (0.1–0.4) расположены у труб центрального вытеснителя и отбора теплоносителя, а также у чехла ТВС. Влияние формы и длины трубы отбора теплоносителя сохраняется на всей протяженности выходной части головки ТВС. Перераспределение потока от трубы отбора в соседние с ней зоны обусловило неоднородность поля аксиальной скорости в сливных окнах верхней опорной плиты, а также привело к образованию зон низкой аксиальной скорости потока.

2. В пучке твэлов были выявлены области, из которых теплоноситель будет поступать в трубу

отбора, и именно в этом месте будет измерять температуру теплоносителя термометр сопротивления. Попадание части потока теплоносителя в трубу отбора происходит преимущественно из тех областей пучка твэлов, которые расположены напротив трубы отбора. Таким образом, в зоне между выходом из головки ТВС и верхней опорной плитой процесс перемешивания теплоносителя имеет низкую интенсивность и наблюдается преимущественно аксиальное движение потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Реакторные** установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние / Д.Л. Зверев, Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов, В.Ю. Галицких, В.И. Полуничев, К.Б. Вешняков, С.В. Кабин, А.Ю. Турусов // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 29–37.
2. **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.
3. **Опыт** создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития / В.М. Беляев, М.А. Большухин, А.Н. Пахомов, А.М. Хизбуллин, А.Н. Лепехин, В.И. Полуничев, К.Б. Вешняков, А.Н. Соколов, А.Ю. Турусов // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 37–43.
4. **Петрунин В.В.** Реакторные установки для атомных станций малой мощности // Вестник РАН. 2021. Т. 91. Вып. 6. С. 528–540. <https://doi.org/10.31857/S0869587321050182>
5. **Методы** обоснования теплотехнической надежности активной зоны 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.
6. **Расчетно-экспериментальные** исследования течения потока теплоносителя в кассетной активной зоне реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // ИФЖ. 2017. Т. 90. Вып. 4. С. 988–996.
7. **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>
8. **Гухман А.А.** Введение в теорию подобия. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1973.
9. **Применение** многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов / С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов // Приборы и методы измерений. 2015. Т. 6. № 2. С. 188–195.

Simulation of the Coolant Hydrodynamics in the Outlet Section of the Fuel Assembly of the Cartridge Core of the RITM Type Reactor

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

^a Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU), Nizhny Novgorod, 603950 Russia

*e-mail: nevid000@mail.ru

Abstract—The results of experimental studies into the hydrodynamics of the coolant at the outlet section of the cassette fuel assembly (FA) of the RITM-type reactor of a low-power ground-based nuclear power plant are presented. The purpose of the work is to analyze the distribution of the axial velocity and flow rate of the coolant at the exit from the fuel bundle, in the modernized head of the fuel assembly, near the coolant extraction pipe and the openings of the upper base plate as well as to determine those areas of the fuel bundle from which the coolant flow is most likely to enter the pipe selection to the resistance thermometer. To achieve this goal, experiments were carried out on a research stand with an air working medium on a model of the outlet section of a fuel cassette, which includes an outlet fragment of a fuel bundle with spacer grids, models of an upgraded fuel cassette head, an upper support plate, and a coolant extraction pipe. When studying the flow of the coolant flow in the outlet part of the fuel cassette, the pneumometric method and the method of injection of a contrasting impurity were used. An area covering the entire cross section of the model was chosen as the area under study. The picture of the coolant flow is represented by cartograms of the distribution of its axial velocity and flow rate as well as cartograms of the distribution of the contrasting impurity in the cross section of the experimental model. The results of the experiments can serve as a basis for making engineering decisions when designing new cores of RITM type reactors. The obtained database of experimental data can be used for validation of modern CFD programs and one-dimensional thermal-hydraulic codes used to justify the thermal reliability of cores.

Keywords: nuclear reactor, core, fuel cassette, fuel rod, spacer grid, upgraded head, coolant extraction tube, axial velocity, axial flow rate, contrast agent, research stand, experimental model