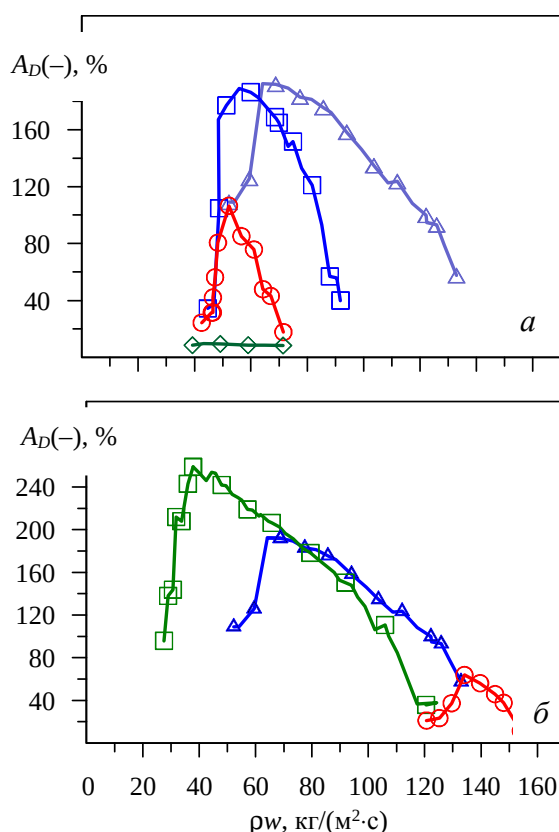
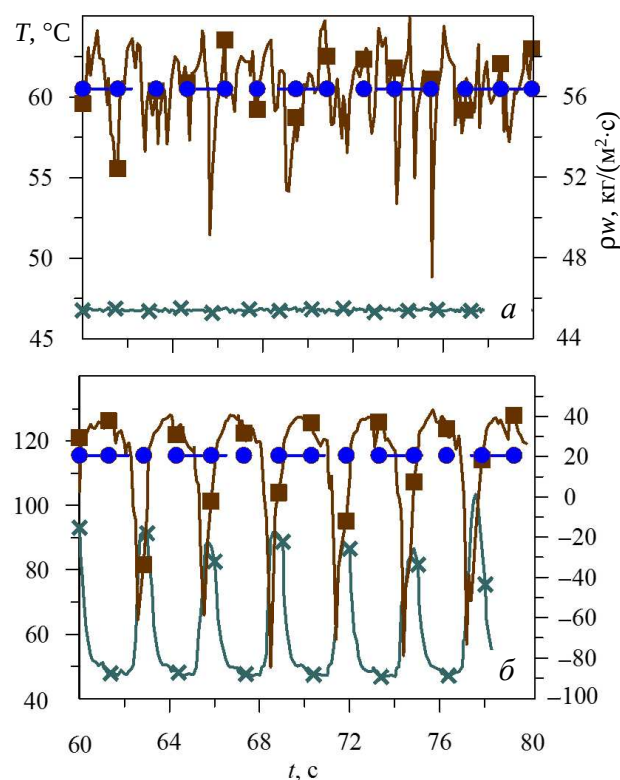




Р и с. 3. Влияние давления пара 0,7 (Δ), 1,5 ($\square$), 2,0 ($\circ$), 3,5 МПа ($\diamond$) (а) и температуры питательной воды 55 ($\square$), 100 (Δ), 140 °С ($\circ$) (б) на амплитуду пульсаций расхода питательной воды

воды был реализован режим с параметрами $G = 1,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $t_r = 280 \text{ °С}$, $P = 0,7 \text{ МПа}$, $t_{п.в} = 55 \text{ °С}$. При средней массовой скорости через исследовательский парогенерирующий канал $\rho_{wcp} = 55,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ отрицательная полуволна амплитуды пульсаций расхода $A_D(-)$ составила 8%, размах пульсаций температуры Rt — $0,6 \text{ °С}$ (рис. 4, а), при $\rho_{wcp} = 19,4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ — 382% и $68,6 \text{ °С}$ соответственно (см. рис. 4, б). Гидродинамический шум в условиях работы испытательного оборудования вызван нестационарно-



Р и с. 4. Изменение мгновенной ($\blacksquare$), средней массовой скорости ($\bullet$) питательной воды через исследовательский парогенерирующий канал и температуры ($\times$) на входе в исследовательский парогенерирующий канал во время реализации режима

стью парообразования, а также работой плунжерного насоса.

Заключение. Результаты испытаний прямоточных рекуперативных теплообменных аппаратов позволяют определить диапазон допустимых нагрузок для парогенерирующих аппаратов, разрабатываемых АО «ОКБМ Африкантов», по условиям параллельно-канальной гидродинамической неустойчивости в исследуемом диапазоне.

Поступила в Редакцию 25.10.22

УДК 621.039.54

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ ТОПЛИВНОЙ КАССЕТЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ТИПА РИТМ АСММ

Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Курицин Д.Д., Пронин А.Н., Рязанов А.В. (Нижегородский гос. технический ун-т, г. Нижний Новгород)
e-mail: nevid000@mail.ru

Значительная концентрация ресурсов в Арктическом регионе обусловила строительство промышленных предприятий, а также создание

источника энергии, обладающего автономностью, надежностью и маневренностью. Научный, конструкторский и производственный опыт,

накопленный при создании судовых реакторных установок, явился основой проекта Госкорпорации «Росатом» — атомных станций малой мощности (АСММ) [1]. В настоящее время разрабатывается АСММ с РИТМ-200С, проектом которой предусматривается новая кассетная активная зона. Топливные кассеты АСММ отличаются от кассет атомных ледоколов геометрией твэльного пучка, конструкцией дистанционирующих решеток, формой центрального вытеснителя и геометрией головки [2]. Изменение геометрии головки может привести к перераспределению поля аксиальной скорости и расхода теплоносителя на выходе из твэльного пучка, а также сказаться на интенсивности его перемешивания и повлиять на теплотехническую надежность активной зоны [3]. Это и обусловило необходимость экспериментального обоснования конструкции головки топливной кассеты.

Использование судовых реакторных технологий в наземном исполнении привело к ужесточению требований к мониторингу теплогидравлических характеристик теплоносителя первого контура и потребовало увеличения числа областей контроля его температуры на выходе из активной зоны с помощью термометров сопротивления, заключенных в трубы отбора теплоносителя и расположенных напротив головок топливных кассет. На показания термометров сопротивления могут влиять неравномерность течения потока на выходе из твэльного пучка и головки ТВС, а также образование горячих или холодных струй теплоносителя. Это снизит точность определения температуры теплоносителя, достоверная информация о которой важна в переходных режимах работы. Таким образом, экспериментальное изучение гидродинамики теплоносителя на выходе из топливной кассеты и определение областей твэльного пучка, откуда теплоноситель попадает в трубу отбора, являются актуальной научной задачей.

Цель работы заключалась в исследовании распределения аксиальной скорости и расхода теплоносителя на выходе из твэльного пучка, за головкой ТВС, перед трубой отбора и в верхней опорной плите и определении областей пучка твэлов, из которых возможно попадание потока в трубу отбора теплоносителя.

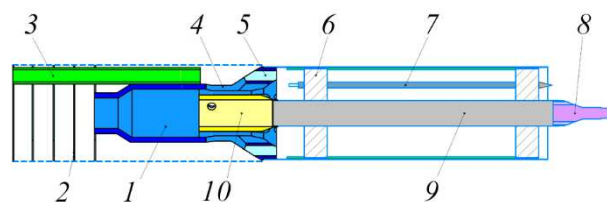
Исследовательский стенд и методика экспериментов. Моделирование гидродинамики течения теплоносителя на выходе из топлив-

ной кассеты проводилось на исследовательском стенде в НГТУ. Исследовательская установка выполнена в виде разомкнутого контура с воздушной рабочей средой и состоит из системы нагнетания потока, экспериментальных моделей и измерительного комплекса. Течение водяного теплоносителя моделируется воздухом с учетом теории гидродинамического подобия [4].

Модель представляет собой канал шестигранной формы с установленными внутри элементами конструкции выходного участка топливной кассеты, включающими пучок стержней с двумя решетками, головки ТВС, центральный вытеснитель, верхнюю опорную плиту с трубой отбора теплоносителя к термометру сопротивления (рис. 1). Элементы модели увеличены в 5,79 раза относительно штатного образца. Выбор такого коэффициента геометрического подобия обусловлен необходимостью обеспечения высоких чисел Рейнольдса, а также минимизацией влияния средств измерения на движение рабочей среды.

Отличием моделей выходного участка топливной кассеты атомного ледокола и АСММ являются форма и число сливных окон головки для радиального выхода теплоносителя. Головка топливной кассеты атомного ледокола имеет три широких сливных окна, АСММ — шесть узких окон. В конструкции головки также имеются сливные отверстия для аксиального истечения теплоносителя, их число и форма неизменны для топливных кассет атомного ледокола и АСММ.

Аксиальную скорость и расход теплоносителя изучали пневмометрическим методом, заключающимся в измерении аксиальной скорости воздушного потока датчиком с погрешностью, не превышающей 7% [5].



Р и с. 1. Схема экспериментальной модели: 1 — головка ТВС; 2, 3 — имитаторы верхней опорной плиты и трубы отбора теплоносителя соответственно; 4, 5 — сливные окна и отверстия головки соответственно; 6 — макет дистанционирующей решетки; 7 — твэльный пучок; 8, 9, 10 — имитаторы наконечника, трубы и втулки центрального вытеснителя соответственно

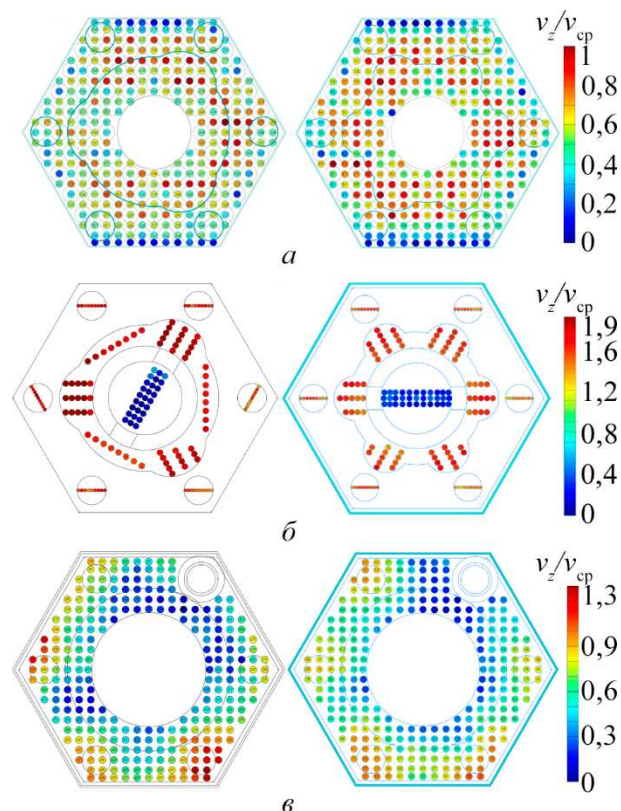
Области поперечного сечения твэльного пучка, из которых теплоноситель попадает в трубу отбора, определяли методом впрыска контрастной примеси (газа пропана) в поток воздушной среды через регулярные ячейки, а также через ячейки, находящиеся возле центрального вытеснителя и уголков жесткости. Концентрация примеси определялась с погрешностью, не превышающей 1,5%.

Аксиальную скорость и расход потока, а также растекание контрастной примеси изучали на выходе из пучка твэлов, сливных отверстий и окон головки ТВС, перед опорной плитой и в ее сливных окнах. Особенности течения теплоносителя в выходном участке кассеты выявляли на основе анализа картограмм распределения безразмерной аксиальной скорости потока, а также растекания примеси.

Безразмерную аксиальную скорость получали нормированием локальной в точке измерения на среднерасходную скорость воздушной среды на входе в модель. Измерения проводили в зоне автомодельного течения воздушной рабочей среды исследовательского стенда, характеризующейся идентичностью безразмерных профилей скорости как воздушной, так и водяной среды. Следовательно, опытные данные могут быть применены при анализе течения теплоносителя в штатной топливной кассете. Измерения проводили при среднерасходной скорости воздушной рабочей среды 31,1—32,6 м/с и числе Рейнольдса 76 000—79 000.

Эксперименты. Экспериментальный коэффициент гидравлического сопротивления головок разной конструкции соответствовал коэффициенту гидравлического сопротивления штатных элементов конструкции топливных кассет при аналогичных числах Рейнольдса.

На выходе из твэльного пучка течение теплоносителя неоднородно, слабо зависит от конструкции головки ТВС и характеризуется образованием локальных минимумов и максимумов аксиальной скорости потока. Наименьшая безразмерная аксиальная скорость 0,1—0,4 наблюдается возле поверхностей чехла и центрального вытеснителя. Локальный максимум безразмерной аксиальной скорости 0,8—1 фиксируется в области проходного сечения конфузора головки. Шесть сливных отверстий в головках не влияют на структуру потока перед ними вследствие малой площади проходного сечения (рис. 2, а).



Р и с. 2. Аксиальная скорость потока на выходе из твэльного пучка (а), из головок ТВС (б) и перед верхней опорной плитой (в): справа, слева — топливная кассета с головкой, оснащенной тремя и шестью сливными окнами соответственно

Истечение теплоносителя из головки ТВС характеризуется образованием высокоскоростных струй на выходе из сливных окон и отверстий. Однородность струйного течения зависит от типа головки. Так, за головкой с тремя сливными окнами безразмерная аксиальная скорость потока составляет 1,4—1,9, за головкой с шестью окнами — 1,4—1,6 (см. рис. 2, б). Столь значительное различие в структуре аксиального потока обусловлено симметричностью и асимметричностью взаимного расположения сливных окон и отверстий.

При движении теплоносителя за головкой ТВС фиксируется перераспределение поля аксиальной скорости. Определяющее влияние на характер протекания этого процесса оказывает геометрия головки. За головкой с тремя сливными окнами минимум и максимум аксиальной скорости отмечается в диаметрально противоположных областях и обусловлен закруткой потока, истекающего из сливных окон. Безразмерная аксиальная скорость в локальном минимуме и максимуме составляет 0,3—0,7 и 0,9—1,3 соответственно. За головкой с шестью сливными

окнами минимальная аксиальная скорость потока 0,4—0,7 наблюдается в областях слияния потоков: радиального из сливных окон и аксиального из отверстий. В свою очередь, максимум аксиальной скорости отмечается между областями слияния аксиального и радиального потоков, безразмерная аксиальная скорость в них 0,9—1,3.

Перед верхней опорной плитой в месте установки головки ТВС, а также возле трубы отбора теплоносителя наблюдается перераспределение потока в сливные отверстия плиты. Для этого процесса характерно образование зон низкой аксиальной скорости потока вокруг головки и трубы отбора. Безразмерная аксиальная скорость составляет 0,2—0,5. В областях перед сливными окнами безразмерная аксиальная скорость значительно выше и составляет 0,8—1,3 (см. рис. 2, в). Процесс перестроения потока протекает идентично за обеими головками, что свидетельствует об отсутствии влияния их геометрии на течение теплоносителя перед верхней опорной плитой.

Между сливными отверстиями плиты поток теплоносителя распределяется неравномерно, что обусловлено установкой трубы отбора вместо одного из них. В сливных отверстиях, удаленных от трубы отбора, безразмерная аксиальная скорость составляет 1,1—1,5, через сливные отверстия вблизи нее теплоноситель течет медленнее, безразмерная аксиальная скорость составляет 0,5—1,2. Такое распределение аксиальной скорости характерно для обеих головок. Таким образом, установка трубы отбора теплоносителя в текущей конфигурации влияет на течение теплоносителя в соседствующих с ней сливных отверстиях плиты.

При истечении теплоносителя из головок ТВС двух типов его аксиальный расход через сливные отверстия распределяется одинаково и составляет через каждое отверстие 4—4,5% интегрального расхода через топливную кассету. Изменение конструкции головки посредством увеличения числа сливных окон с трех до шести приводит к снижению аксиального расхода теплоносителя через каждое окно с 25 до 12%. Таким образом, при истечении теплоносителя из головки с шестью окнами аксиальный расход распределяется более равномерно в поперечном сечении, чем за головкой с тремя окнами.

На выходе из пучка твэлов перемешивание теплоносителя низкоинтенсивное. Это подтверждается слабым размытием контрастной примеси в поперечном сечении, охватывающем ячейку впрыска, а также одну или две соседние ячейки. Концентрация контрастной примеси в ячейках впрыска составляет 2000—2400 млн⁻¹. Степень размытия примеси не зависит от расположения ячейки в твэльном пучке и типа головки. На выходе из пучка твэлов фиксируется растекание контрастной примеси в направлении центральной части модели, обусловленное особенностями входа потока в конфузор головки ТВС.

За головкой ТВС с тремя сливными окнами примесь попадает в трубу отбора теплоносителя из всех ячеек впрыска, с шестью сливными окнами — из регулярных и из ячейки возле центрального вытеснителя. Концентрация примеси в трубе отбора при установке обеих головок составляет 150—300 млн⁻¹. Распределение контрастной примеси перед трубой отбора показывает, что перемешивание теплоносителя за головкой с тремя сливными окнами интенсивнее. Это обусловлено асимметричностью аксиального течения потока, вызванного закруткой теплоносителя на выходе из головки с тремя окнами из-за особенностей взаимного расположения сливных окон и отверстий.

Выводы. Таким образом, эксперименты показали влияние конструкции головки ТВС на гидродинамические характеристики течения теплоносителя. Оно выразилось в неоднородности течения аксиального потока на выходе из твэльного пучка, из головок ТВС и перед верхней опорной плитой, преимущественно обусловленной конструкцией головки. За головкой с тремя сливными окнами безразмерная аксиальная скорость составляет 1,4—1,9 и 1,4—1,6 за головкой с шестью окнами.

Перемешивание теплоносителя наиболее интенсивно за головкой с тремя сливными окнами, что обусловлено неоднородностью распределения потоков, выходящих из ее окон и отверстий, и подтверждается попаданием контрастной примеси в трубу отбора из всех ячеек впрыска. За головкой с шестью окнами зафиксировано более однородное поле аксиальной скорости потока, что также может влиять на перемешивание теплоносителя и, как следствие, на точность показаний термометра сопротивления.

Исключение из конструкции головки ТВС с шестью сливными окнами аксиальных отверстий позволит улучшить перемешивание теплоносителя за счет интенсификации радиальных потоков на выходе из сливных окон.

Результаты исследований использованы при обосновании инженерных решений проектирования активных зон АО «ОКБМ Африкантов». Опытные данные использованы при валидации CFD-программы ЛОГОС.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев В.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н. и др. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направ-

ления дальнейшего развития. — Атомная энергия, 2020, т. 129, вып. 1, с. 37—43.

2. Зверев Д.Л., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние. — Там же, с. 29—37.
3. Дмитриев С.М., Баринов А.А., Самойлов О.Б., Хробостов А.Е. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов. — Там же, 2016, т. 120, вып. 5, с. 270—275.
4. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973.
5. Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Применение многоканального пневмометрического зонда для исследований профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов. — Приборы и методы измерения, 2015, т. 6, вып. 2, с. 188—195.

Поступила в Редакцию 14.04.23

УДК 621.039.546:621.039.542.34

ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ С УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМИ УРАНОЕМКИМИ ДИСПЕРСИОННЫМИ ТВЭЛАМИ

Савченко А.М., Картюк Л.А., Дергунова Е.А., Коновалов Ю.В., Кулаков Г.В., Маранчак С.В., Ершов С.А., Купенко В.И., Майников Е.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: sav-alex111@mail.ru

В настоящее время в тепловых и быстрых реакторах используется таблеточное диоксид-урановое топливо или смешанное оксидное уран-плутониевое. Однако топливо такого типа имеет ограничения, например, недостаточную ураноемкость. Это снижает коэффициент воспроизводства и выгорание, что требует применения смешанного оксидного уран-плутониевого топлива с содержанием более 7% по массе диоксида плутония. Поэтому кампания активной зоны ВВЭР-1000 для твэлов с таким топливом составляет около 3—4 лет, в то время как с диоксидурановым от четырех до 5 лет. Ухудшение изотопного состава плутония от цикла к циклу позволяет использовать смешанное оксидное уран-плутониевое топливо в тепловых реакторах только в одном цикле. Недостатками также являются высокая температура и пониженная работоспособность в режиме переменной мощности. Увеличение продолжительности кампании потребует превышения 5%-ного барьера обогащения. Кроме того, технология переработки уран-плутониевого топлива сложная, и оно дороже обычного диоксидуранового.

Повторно используемое смешанное уран-плутониевое топливо может быть многократно применено в топливном цикле за счет достаточного количества делящихся изотопов. Однако оно требует постоянной подпитки обогащенным ураном и сопровождается накоплением ^{232}U и ^{236}U . Технология переработки также сложная.

Поскольку возможности совершенствования твэлов контейнерного типа почти исчерпаны, большой интерес вызывают альтернативные виды топлива и конструктивное исполнение твэлов. В частности, рассматривается переход к твэлам дисперсионного типа, которые имеют [1—4]:

низкий перепад температуры по сечению твэла благодаря теплопроводной матрице и металлургическому контакту оболочки с топливной композицией;

возможность достижения высокого выгорания топлива, обусловленного повышенной радиационной стойкостью.

Известно также, что твэлы дисперсионного типа допускают эксплуатацию в маневренных режимах почти без ограничения их числа и глу-