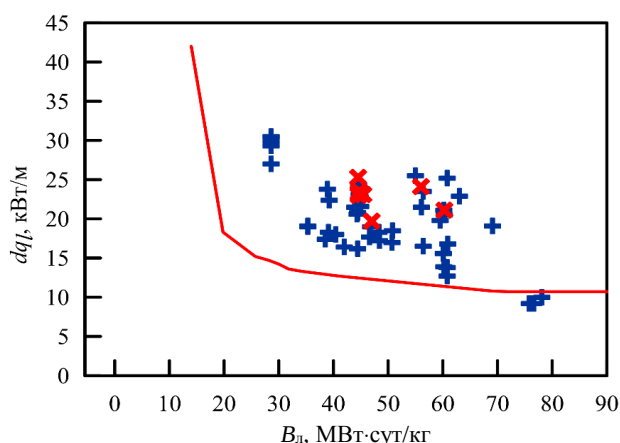




Р и с. 4. Лимитная кривая ограничения повышения линейной мощности и результаты экспериментов: +, × — герметичные и негерметичные твэлы соответственно

ставленный метод универсален и может быть использован для переходных режимов нарушения нормальной эксплуатации для разработки лимитной кривой ограничения максимальной остаточной деформации твэла. Анализ показал, что оптимальное число расчетных историй должно составлять не менее 1 тыс. Сравнение показало, что расчетная лимитная кривая для твэла ВВЭР-1200 является консервативной, поскольку экспериментальные данные, при которых произошла разгерметизация твэлов, ее превышают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** ядерной безопасности реакторных установок атомных станций, НП-082. М.: Ростехнадзор, 2008.
2. **Основные** требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне водо-водяных энергетических реакторов (НП-094—15). М.: Ростехнадзор, 2015.
3. **Analysis of Differences in Fuel Safety Criteria for WWER and Western PWR Nuclear Power Plants.** Vienna: IAEA-TECDOC-1381, 2003.
4. **Sanchez-Torrijos J., Aragón P., Uffelen P. e.a.** A review on the thermo-mechanical modelling needs in system codes. — J. Nucl. Mater., 2023, v. 406, p. 112243.
5. **Nuclear Fuel Safety Criteria.** Techn. Rev. OECD, 2012.
6. **Cox B.** Pellet-clad interaction (PCI) failures of zirconium alloy fuel cladding — a review. — J. Nucl. Mater., 1990, v. 172, p. 249—292.
7. **Iman R.** Latin Hypercube Sampling. Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment. American Cancer Soc., 2008.
8. **Kuznetsov V.I., Demyanov P.G., Izhutov A.L. e.a.** Calculational and experimental studies of the UO_2 — Gd_2O_3 doped VVER-1000 fuel rods during the power ramp test in the research reactor MIR. — In.: Conf. TopFuel 2015. Reactor Fuel Performance. Belgium, 2015, p. 39—47.
9. **Kuznetsov V.I., Avdonina E.A., Krupkin A.V. e.a.** Simulating of the fuel rod behaviour under fast power ramp conditions. — In: Progress on PCI SCC: Experimentation, Modelling and Methodologies Applied to Support the Flexible Operation of Nuclear Power Plants. Vienna: IAEA-TECDOC-1960, 2021, p. 256—261.

Поступила в Редакцию 8.12.23

УДК 621.039.54

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ ТВС РЕАКТОРА РИТМ АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА

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: demkina.td@mail.ru

Безопасная навигация по Северному морскому пути осуществляется благодаря атомному ледокольному флоту, в состав которого входят ледоколы нового поколения с реакторными установками РИТМ-200. Опыт эксплуатации РИТМ-200 на универсальных ледоколах «Арктика» и «Сибирь» определил направления модернизации кассетной активной зоны для увеличения ее энергоресурса, что потребовало разработки ТВС новой конструкции [1]. Это обусловило комплекс экспериментальных и рас-

четных исследований, направленных на обоснование конструкции новых ТВС, в частности, экспериментального изучения формирования потока теплоносителя на выходе из ТВС, а также получения коэффициентов гидравлического сопротивления отдельных элементов выходного участка ТВС. Кроме того, при проектировании ТВС новой конструкции необходимо было определить расход теплоносителя через центральный вытеснитель и трубу отбора теплоносителя к термометру сопротивления.

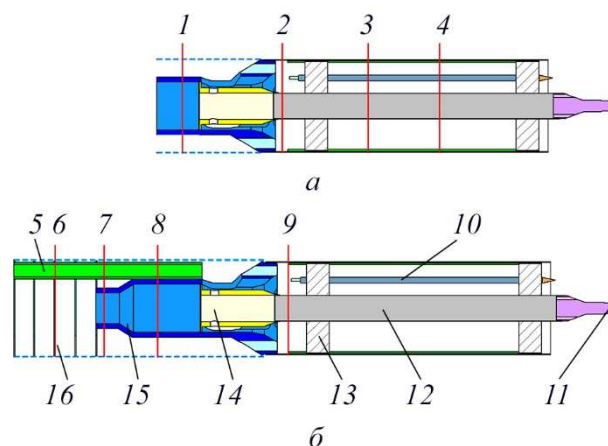
Целями исследований являлись измерение коэффициентов гидравлического сопротивления отдельных элементов ТВС, расхода теплоносителя через центральный вытеснитель и трубу отбора теплоносителя к термометру сопротивления, а также выявление закономерностей течения потока на выходе из ТВС, которые можно использовать для обоснования новых конструктивных решений.

Настоящая статья является продолжением исследований гидродинамики теплоносителя за головками ТВС двух типов конструкции для атомного ледокола и атомной станции малой мощности [2]. В представленной статье особое внимание уделено определению коэффициентов гидравлического сопротивления отдельных элементов выходного участка ТВС, а также влиянию головки ТВС на коэффициент гидравлического сопротивления выходной части твэльного пучка. Кроме того, описана структура течения теплоносителя из головки ТВС конструкции, применяемой в составе реакторной установки атомного ледокола.

Исследовательский стенд и методики экспериментов. Течение теплоносителя моделировали воздушной средой на аэродинамическом стенде, который представляет собой разомкнутый контур, имеющий в своем составе вентилятор высокого давления, ресиверную емкость, экспериментальную модель и измерительный комплекс. Течение водяного теплоносителя имитировали воздухом с учетом теории гидродинамического подобия [3].

Экспериментальная модель, состоящая из шестигранного чехла, твэльного пучка, двух дистанционирующих решеток, центрального вытеснителя с поглощающим элементом и втулкой центрального вытеснителя, головки ТВС, трубы отбора теплоносителя к термометру сопротивления и фрагмента верхней опорной плиты, изготовлена в масштабе 5,8:1 относительно штатной конструкции ТВС (рис. 1). Масштаб выбран таким образом, чтобы нивелировать возмущение потока, вносимое измерительным оборудованием.

Исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе определяли суммарный коэффициент гидравлического сопротивления модели без установки трубы отбора теплоносителя к термометру сопротивления и имитатора фрагмента верхней опорной плиты (см.



Р и с. 1. Модель без верхней опорной плиты и трубы отбора (а) и с их установкой (б): 1—4 — сечение измерения статического давления; 5 — труба отбора теплоносителя; 6—9 — сечение измерения осевой скорости; 10 — твэльный пучок; 11 — наконечник центрального вытеснителя; 12 — центральный вытеснитель; 13 — дистанционирующая решетка; 14 — втулка центрального вытеснителя; 15 — головка ТВС; 16 — фрагмент опорной плиты

рис. 1, а), а также ее отдельных участков: фрагмента твэльного пучка между дистанционирующими решетками, выходной части твэльного пучка с одной дистанционирующей решеткой и участка, включающего головку и втулку центрального вытеснителя. На втором этапе модель модернизировали путем установки имитаторов трубы отбора теплоносителя к термометру сопротивления и фрагмента верхней опорной плиты (см. рис. 1, б), после чего исследовали распределение осевой скорости потока в нескольких сечениях по длине модели.

Коэффициент гидравлического сопротивления участков модели определяли по методике [4], позволяющей по перепаду статического давления на выбранном участке его измерять с погрешностью, не превышающей 8%, в диапазоне чисел Рейнольдса 20 000—80 000 с шагом 10 000. Измерение коэффициента гидравлического сопротивления фрагмента твэльного пучка между дистанционирующими решетками заключалось в определении коэффициента гидравлических потерь на трение, поскольку на данном участке нет препятствий для движения потока. В рамках его определения для двух участков ТВС: фрагмента твэльного пучка между дистанционирующими решетками и выходной части твэльного пучка с одной дистанционирующей решеткой было оценено влияние головки ТВС на коэффициент гидравлического сопротивления участков при разных числах

Рейнольдса. Для этого статическое давление измеряли дважды: с установленной головкой и без нее.

Расход через центральный вытеснитель с поглощающим элементом определяли посредством суммирования расхода через кольцевой зазор, образованный внутренней поверхностью центрального вытеснителя и внешней частью поглощающего элемента, и через центральное отверстие поглощающего элемента. Расход через кольцевой зазор определяли путем измерения полного и статического давления в нем, через центральное отверстие поглощающего элемента из-за сложности конструкции — посредством измерения осевой скорости трубкой Пито.

Перераспределение осевой скорости потока воздушной рабочей среды по длине модели исследовали пневмометрическим методом, позволяющим ее определять с погрешностью, не превышающей 7% [5, 6].

Осевую скорость потока на выходе из ТВС измеряли в сечениях, расположенных в области наконечников твэлов, в широкой и узкой частях головки ТВС, а также во фрагментах отверстий имитатора фрагмента верхней опорной плиты. Расход теплоносителя, поступающего в трубу отбора теплоносителя, определяли посредством измерения осевой скорости в трубе.

Течение теплоносителя на выходе из ТВС моделировали при среднерасходной скорости в твэльном пучке модели 31 м/с и числе Рейнольдса 80 000.

Экспериментальные данные визуализировали картограммами безразмерной осевой скорости потока, полученной посредством отношения скорости потока в точке измерения к среднерасходной скорости воздушной рабочей среды в характерной области модели, которая изменяется в зависимости от проходного сечения ТВС. В области наконечников твэлов она составляет 17,5 м/с, в широкой и узкой частях головки — 26,8 и 18,3 м/с соответственно, во фрагментах окон верхней опорной плиты — 36,9 м/с.

Исследования проводили в области автономности, что позволяет использовать полученные данные для анализа структуры потока теплоносителя на выходе из штатной ТВС и выбора оптимального расположения точек контроля температуры теплоносителя.

Результаты экспериментов. Зависимость коэффициента гидравлических потерь на трение во фрагменте твэльного пучка между дистанционирующими решетками от числа Рейнольдса имеет нисходящий характер. При малых числах Рейнольдса установка головки в модель оказывает значительное влияние на коэффициент гидравлического сопротивления. Так, при числе Рейнольдса 20 000 он составляет 0,042 в модели с головкой и 0,025 без нее. В зоне автомобильного движения потока при числе Рейнольдса свыше 40 000 влияние головки на коэффициент гидравлических потерь на трение отсутствует. Коэффициент потерь на трение при числе Рейнольдса 80 000 составляет 0,023.

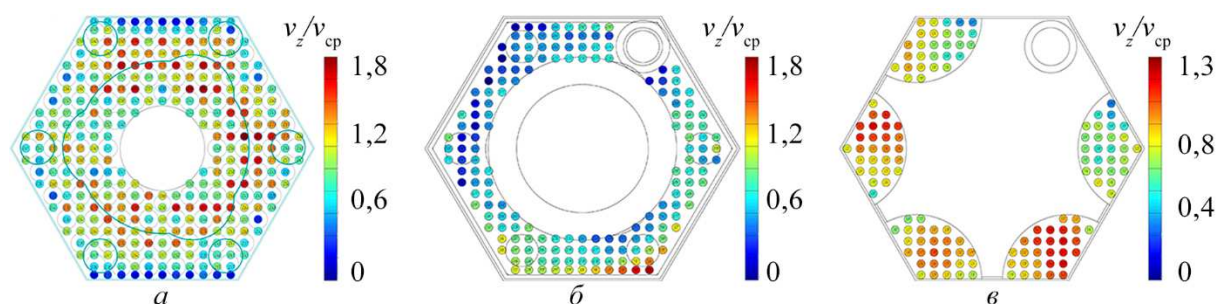
При числе Рейнольдса 20 000 установка головки в модель влияет на коэффициент гидравлического сопротивления выходной части твэльного пучка с одной дистанционирующей решеткой. Различие между случаями установки головки и ее отсутствием составляет 10%. При числе Рейнольдса больше 50 000 сопротивление почти не отличается и составляет 1,07.

Коэффициент гидравлического сопротивления участка, включающего головку ТВС и втулку центрального вытеснителя, снижается при увеличении числа Рейнольдса. При числе Рейнольдса более 50 000 коэффициент гидравлического сопротивления составляет 2,55.

Зависимость общего коэффициента гидравлического сопротивления исследуемых участков от числа Рейнольдса в диапазоне 20 000—60 000 имеет вид, близкий к параболической функции. При увеличении числа Рейнольдса свыше 60 000 коэффициент гидравлического сопротивления равен 3,64.

Расход воздушной рабочей среды через центральный вытеснитель с имитатором поглощающего элемента составляет 2,2%.

В области наконечников твэлов распределение осевой скорости потока неравномерное. Это обусловлено торможением потока о поверхности чехла и центрального вытеснителя и перераспределением части расхода в центральную область, что подтверждается наибольшей осевой скоростью 1,2—1,8 перед проходным сечением конфузора головки ТВС (рис. 2, а). Напротив входа в одно из отверстий головки ТВС для радиального истечения рабочей среды осевая скорость наименьшая по сравнению с остальными двумя, что обусловлено влиянием несимметрич-



Р и с. 2. Осевая скорость потока в области наконечников твэлов (9 на рис. 1) (а), в широкой части головки ТВС (8 на рис. 1) (б), во фрагментах сливных окон верхней опорной плиты (6 на рис. 1) (в)

ности проходного сечения конфузора. Различие безразмерной осевой скорости потока через отверстия головки ТВС достигает 25%.

При истечении потока из отверстий головки ТВС в ее широкой части наблюдается образование областей низкой и высокой скорости потока, расположенных в диаметрально противоположных частях поперечного сечения. При этом минимальная скорость составляет 0,2—0,7, максимальная — 1,8 (см. рис. 2, б). Такое распределение осевой скорости обусловлено несимметричностью структуры потока, истекающего из отверстий головки ТВС. Несимметричность усиливается трубой отбора теплоносителя к термометру сопротивления, установленной на выходе одного из отверстий головки ТВС. В узкой части головки сохраняется влияние трубы отбора теплоносителя к термометру сопротивления, выраженное сохранением области низкой осевой скорости потока возле ее поверхности. Безразмерная скорость составляет 0,2—1,2. Неоднородность осевого потока снижается и выражается лишь сохранением расположения области высокой скорости потока, достигающей 2,2. В оставшемся сечении наблюдается перестроение поля скорости таким образом, что напротив фрагментов сливных окон верхней опорной плиты фиксируется наибольшая осевая скорость 1,4—2,2.

Во фрагментах окон верхней опорной плиты сохраняется влияние трубы отбора теплоносителя к термометру сопротивления, выраженное в том, что в ближайших к трубе окнах осевая скорость на 15% ниже, чем в остальных (см. рис. 2, в).

В трубе отбора теплоносителя распределение осевой скорости равномерное 0,6—0,7. В трубу отбора попадает 3% общего расхода рабочей среды через модель выходного участка ТВС.

Выводы. Экспериментально определены коэффициенты гидравлического сопротивления трех участков модели выходного участка ТВС: фрагмента твэльного пучка между дистанционирующими решетками, выходной части твэльного пучка с одной дистанционирующей решеткой, головки ТВС с втулкой центрального вытеснителя, а также суммарный коэффициент гидравлического сопротивления модели, который составляет 0,023, 1,07, 2,55 и 3,64 соответственно. Выявлены общие закономерности движения потока на выходе из ТВС. В области наконечников твэлов наблюдается формирование неоднородности поля осевой скорости, вызванное асимметрично расположенными отверстиями головки ТВС. Это влияние усиливается на выходе из головки из-за наличия трубы отбора теплоносителя к термометру сопротивления и распространяется до ее широкой части. Затем на структуру поля осевой скорости основное влияние оказывают труба отбора теплоносителя и верхняя опорная плита.

Расход теплоносителя через центральный вытеснитель и трубу отбора теплоносителя составляет 2,2 и 3% соответственно.

Полученные опытные данные использованы для обоснования выбора расположения точек контроля температурного состояния теплоносителя на выходе из активной зоны.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлов О.Б., Романов А.И., Галицких В.Ю и др. Анализ опыта эксплуатации активных зон атомных ледоколов первого поколения. База данных в обоснование и развитие новых атомных ледоколов и плавучих энергоблоков. — Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок, 2023, вып. 3, с. 16—24.

2. Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А. и др. Особенности гидродинамики теплоносителя на выходе из топливной кассеты активной зоны реактора типа РИТМ АСММ. — Атомная энергия, 2023, т. 134, вып. 3—4, с. 143—147.
3. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.
5. Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Применение многоканального пневмо-

метрического зонда для исследований профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов. — Приборы и методы измерения, 2015, т. 6, вып. 2, с. 188—195.

6. Дмитриев С.М., Баринов А.А., Варенцов А.В. и др. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя на масштабной модели кассетной ТВС реактора КЛТ-40С. — Теплоэнергетика, 2016, вып. 8, с. 41—48.

Поступила в Редакцию 28.02.24

УДК 621.865

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ РАЗДЕЛКИ И РЕЗКИ ОТРАБОТАВШИХ ТВС И ТВЭЛОВ НА ГОЛОВНЫХ ОПЕРАЦИЯХ РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЗАМКНУТОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Жеребцов А.А., Мочалов Ю.С., Усманов А.Э., Рыбаков А.Н., Дмитриев С.А. (АО «Прорыв», г. Москва), Шиманский С.А., Дунаев В.И. (АО «Диаконт», г. Санкт-Петербург)
e-mail: zhala@pnproryv.ru

В настоящей работе показана актуальность лазерной разделки отработавших ТВС и твэлов на примере головных операций модуля переработки отработавшего ядерного топлива быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем, создаваемого в рамках проектного направления «Прорыв».

В промышленном производстве в настоящее время наиболее освоены только механические методы — «мокрые» под слоем воды или иной жидкости и «сухие» в воздушной или газовой среде. Мокрая механическая и электромеханическая (электроэрозионная) разделка применяется в нашей стране для фрагментации ТВС РБМК по ОСТу 95 10585—2003 [1] и ВВЭР по ГОСТу 28506—90 [2] в ПО «Маяк». Специфика ТВС состоит, в основном, в низком обогащении топлива и оболочек твэлов на основе циркониевых сплавов. Для ТВС с высоким обогащением топливной композиции, характерным для быстрых реакторов, мокрая разделка нецелесообразна. Указанные методы сложны, и необходимо искать новые способы для внедрения в промышленных масштабах.

Создаваемый в нашей стране модуль переработки отработавшего ядерного топлива в составе промышленного энергокомплекса предназначен для переработки ТВС БН-1200М — чехловая ТВС с твэлами с навитой дистанционирующей проволокой и БР-1200 — бесчехло-

вая ТВС с дистанционирующими решетками и гладкими твэлами. Фрагментация ТВС обоих типов на модуле переработки должна соответствовать следующим критериям: производительность не менее двух ТВС в сутки с возможностью увеличения, интегральная стойкость оборудования к воздействию ионизирующего излучения до 2 МГр, минимальные потери ядерных материалов при разделке, минимизация поступающих на последующие операции конструкционных материалов, минимизация или предотвращение замытий концов фрагментов твэлов, минимизация образующихся отходов, компактность установки и возможность получения образцов для послереакторных исследований, фрагментация твэлов с дистанционирующей проволокой, минимизация замены режущих элементов, дистанционное роботизированное обслуживание.

Указанным условиям для промышленных установок замкнутого ЯТЦ отвечает лазерная резка для разделки ТВС и фрагментирования твэлов [3]. Лазерная резка предпочтительнее других методов, поскольку является бесконтактной (отсутствие ножей), для нее характерны высокая скорость реза, простота дистанционного управления, большой ресурс режущей лазерной головки, минимальный удаленный ремонт и замена деталей, отсутствие охлаждающей жидкости и минимальное образование отходов —