

разных проектов ВВЭР. Использование всех доступных данных увеличит гибкость модели и существенно расширит область решаемых с ее помощью задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Deterministic** Safety Analysis for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide SSG-2 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2019.
2. **Общие** положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001—15. М.: Ростехнадзор, 2015.
3. **Uvakin M.A., Nikolaev A.L., Makhin I.V., Sotskov E.V.** Safety assessment calculation procedure for operating VVER unit in maneuvering regimes experiment. — *Kerntechnik*, 2020, v. 85, p. 274—281.
4. **Uvakin M.A., Alekhin G.V., Bykov M.A., Zaitsev S.I.** Verification of three-dimensional neutron kinetics model of TRAP-KS code regarding reactivity variations. — *Ibid.*, 2016, v. 81, p. 394—400.
5. **Breiman L.** Random forests. — *Machine Learning*, 2001, v. 45, p. 5—32.
6. **Yang Y., Morillo I.G., Hospedales T.** Deep neural decision trees. — In: *Proc. of ICML Workshop on Human Interpretability in Machine Learning*, 2018, p. 34—40.
7. **Kontschieder P., Fiterau M., Criminisi A., Bulò S.R.** Deep neural decision forests. — In: *Proc. of the Twenty-Fifth Intern. Joint Conf. of Artificial Intelligence (IJCAI-16)*, 2015, p. 4190—4194.
8. **Wan A., Dunlab L., Ho D. e.a.** NBDT: neural-backed decision tree. — In: *Proc. of ICLR*, 2021, p. 120—133.
9. **Shichao Li, Kwang-Ting Cheng.** Visualizing the decision-making process in deep neural decision forest. — In: *Proc. of the IEEE/CVP Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, p. 114—117.
10. **Требования** к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР. НП-006—16. М.: Ростехнадзор, 2017.

Поступила в Редакцию 10.04.24

УДК 621.039.54

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В ТВС РЕАКТОРА РИТМ АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА

Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В.

(Нижегородский гос. технический ун-т, г. Нижний Новгород)

e-mail: nevid000@mail.ru

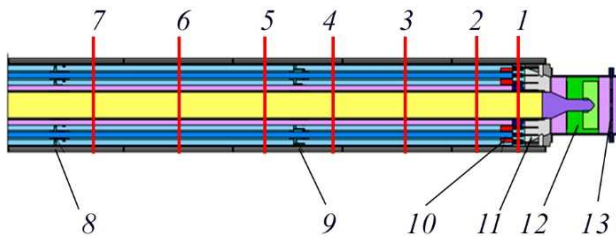
Стабильная перевозка грузов по трассе Северного морского пути невозможна без атомных ледоколов, играющих важную роль в обеспечении безопасности находящихся на трассе судов. Большинство построенных атомных ледоколов в настоящее время выработали назначенный срок, поэтому требуется создание новых атомных судов этого класса. С этой целью в АО «ОКБМ Африкантов» спроектирована реакторная установка РИТМ, включающая инновационные конструктивные решения [1].

Одним из основных элементов реактора является кассетная активная зона с повышенным энергоресурсом, которая требует экспериментального и расчетного обоснования ее конструкции [2—4]. Одним из этапов обоснования является экспериментальное исследование гидродинамики теплоносителя в отдельной ТВС, а именно неоднородности аксиальной скорости потока в пучке твэлов, обусловленной сложной геометрией входного участка. Исследования позволят обосновать конструкцию не только узлов ТВС, но и активной зоны в целом. Распре-

деление аксиальной скорости потока на входе в твэльный пучок дает возможность уточнить методики теплогидравлического расчета активных зон [5]. Таким образом, целью работы является исследование неоднородности аксиальной скорости потока на входе в ТВС.

Исследовательский стенд и методика экспериментов. Течение водяного теплоносителя на входе в ТВС моделировалось воздушной рабочей средой исследовательского стенда с учетом теории гидродинамического подобия. Исследовательская установка представляет собой разомкнутый контур, состоящий из системы нагнетания воздушной рабочей среды, экспериментальной модели и средств измерения [6, 7].

Экспериментальная модель выполнена в виде двух последовательно установленных каналов круглой и шестигранной формы (рис. 1). Канал круглой формы имитирует часть ТВС, установленную в нижнюю опорную плиту реактора, канал шестигранной формы — фрагмент твэльного пучка. Два канала соединяются имитатором диффузора, выполненного в соответст-



Р и с. 1. Измерение аксиальной скорости потока по длине модели: 1 — сечение в узле крепления твэлов к диффузору; 2—7 — сечения, равномерно расположенные в твэльном пучке; 8, 9 — дистанционирующие решетки; 10 — поглощающая решетка; 11 — узел крепления твэлов к диффузору; 12, 13 — имитатор шарикового замка и дроссельной шайбы соответственно

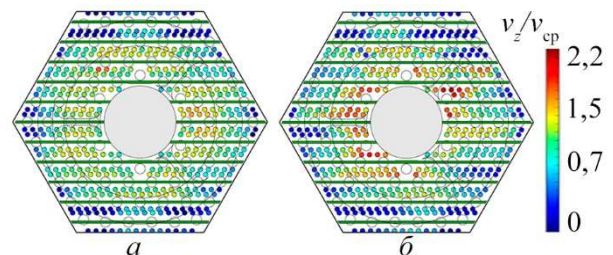
вии со штатной конструкцией. К диффузору крепятся имитаторы твэлов, труба центрального вытеснителя и проточная часть шарикового замка. В канале шестигранной формы расположен фрагмент твэльного пучка с имитаторами двух дистанционирующих, одной поглощающей решеток, шести уголков жесткости и центрального вытеснителя. На входе в канал круглой формы установлен имитатор дроссельной шайбы, состоящий из двух дисков с отверстиями разного диаметра в центральной части. Площадь проходного сечения имитатора дроссельной шайбы изменяется посредством коаксиального вращения дисков. Экспериментальная модель увеличена относительно натурного изделия для нивелирования влияния средств измерения на движущийся воздушный поток, коэффициент геометрического подобия модели составляет 5,79. Экспериментальная модель повторяет геометрию проточной части штатного входного участка ТВС.

Аксиальную скорость потока измеряли пневмометрическим методом в нескольких областях по длине модели: в узле крепления твэлов к диффузору, в пучке имитаторов твэлов непосредственно перед решетками и после них по ходу движения потока, а также посередине между решетками с погрешностью, не превышающей 7%. Измерения проводили для двух конфигураций проходного сечения дроссельной шайбы: открытого и частично перекрытого. Площадь проходного сечения дроссельной шайбы в открытом и частично перекрытом состояниях отличалась в 2 раза. Поперечное сечение модели разбивали на точки, в которых определяли аксиальную скорость. Скорость воздушного потока на входе в модель составляла 12—22,1 м/с, критерий Рейнольдса 31 000—58 000.

Указанные диапазоны скорости воздушного потока и критерия Рейнольдса обусловлены конструкцией шайбы и размером ее проходного сечения.

Неоднородность потока на входе в ТВС, а также размер области ее распространения по длине пучка имитаторов твэлов определяли с помощью картограмм безразмерной аксиальной скорости, посредством нормирования скорости в точке на скорость потока воздуха на входе в модель. Неоднородность потока на входе в ТВС исследовали в зоне автомодельности, характеризующейся неизменностью безразмерного профиля скорости воздушной и водяной сред, что делает возможным использовать опытные данные для изучения течения водяного теплоносителя.

Эксперименты. На входе в твэльный пучок ТВС аксиальное течение потока приобретает ярко выраженную неоднородность, обусловленную сложной геометрией входного участка с большим числом последовательно установленных элементов, таких, как дроссельная шайба, ребра жесткости шарикового замка и диффузора, узел крепления твэлов к диффузору. В пучке твэлов в месте их крепления к диффузору образуются две области с низкой и высокой аксиальной скоростью потока (рис. 2, а). На периферии пучка твэлов фиксируется низкая аксиальная скорость потока, охватывающая два ряда твэлов в углах и возле граней чехла ТВС, параллельных пластинам узла крепления твэлов, а также один ряд твэлов у граней чехла, расположенных под углом относительно пластин узла крепления твэлов. Безразмерная скорость в углах и возле граней чехла составляла 0,1—0,4 и 0,3—1 соответственно. Область высокой аксиальной скорости потока расположена в центре за проходным сечением диффузора. Безразмерная скорость в ней равна 1—1,6.



Р и с. 2. Безразмерная аксиальная скорость потока в узле крепления твэлов к диффузору при открытом (а) и частично перекрытом проходным сечением шайбы (б)

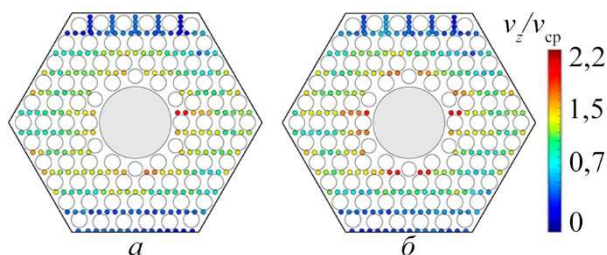
В области низкой аксиальной скорости возле граней чехла ТВС, параллельных пластинам узла крепления твэлов, скорость потока фрагментирована. По центру двух граней чехла безразмерная аксиальная скорость составляла 0,9—1, в оставшейся области — 0,3—0,4. Это обусловлено наличием двух пазов для дополнительной его протечки в диффузоре, расположенных посередине двух граней. Описанная структура потока характерна для случая установки дроссельной шайбы с открытым проходным сечением.

Частичное перекрытие проходного сечения дроссельной шайбы привело к увеличению безразмерной аксиальной скорости потока в области узла крепления твэлов, лежащей за проходным сечением диффузора, до 1,4—2,2 (см. рис. 2, б). Столь значительный рост скорости обусловлен высокоскоростными потоками из отверстий шайбы. Безразмерная аксиальная скорость в них составляла 1,8—2,2. При частичном перекрытии сечения шайбы фиксируется незначительная закрутка потока на выходе из диффузора. Ее наличие подтверждается смещением областей высокой и низкой аксиальной скорости потока возле граней чехла ТВС.

В активную часть твэльного пучка за поглощающей решеткой поток поступает со значительной неоднородностью аксиальной скорости (рис. 3, а). В структуре аксиального потока, движущегося в активной части твэльного пучка, можно выделить:

области низкой аксиальной скорости, которые охватывают два ряда твэлов, расположенных возле граней чехла ТВС, параллельных пластинам узла крепления твэлов. Безразмерная скорость в них составляла 0,2—0,5;

область высокой аксиальной скорости, охватывающая два ряда твэлов от центрального вытеснителя. Безразмерная скорость в ней составляла 1,4—1,8;



Р и с. 3. Безразмерная аксиальная скорость потока в активной части пучка твэлов за поглощающей решеткой при открытом (а) и частично перекрытом проходным сечением шайбы (б)

область регулярных ячеек, занимающая оставшееся поперечное сечение твэльного пучка. Безразмерная аксиальная скорость потока в ней 0,8—1,3.

Перекрытие проходного сечения шайбы увеличило безразмерную аксиальную скорость потока возле центрального вытеснителя до 1,6—2, а также вызвало закрутку потока, о которой можно судить по смещению зон высокой и низкой скорости возле чехла ТВС. Таким образом, в начале активной части твэльного пучка сохраняется влияние степени перекрытия проходного сечения шайбы (см. рис. 3, б).

Перед первой дистанционирующей решеткой в твэльном пучке фиксируется выравнивание аксиальной скорости потока, однако общая структура потока с наличием областей низкой и высокой скорости потока остается неизменной, изменилась только скорость в выделенных областях. Поток перед первой дистанционирующей решеткой имеет следующую структуру:

область низкой аксиальной скорости, которая охватывает два ряда твэлов, расположенных возле граней чехла ТВС, параллельных пластинам узла крепления твэлов. Безразмерная скорость в них составляла 0,7—0,8;

область высокой аксиальной скорости, охватывающая два ряда твэлов возле центрального вытеснителя. Безразмерная скорость в ней составляла 1,1—1,6;

область регулярных ячеек, занимающая оставшееся поперечное сечение твэльного пучка. Безразмерная аксиальная скорость потока в ней составляла 0,9—1,1.

Перекрытие сечения шайбы увеличило безразмерную аксиальную скорость потока возле центрального вытеснителя до 1,4—1,8 перед первой дистанционирующей решеткой, что подтверждает влияние степени перекрытия проходного сечения дроссельной шайбы на движение потока. Закрутка потока перед первой дистанционирующей решеткой не фиксируется.

За первой дистанционирующей решеткой влияние на поток струйных течений из отверстий дроссельной шайбы, увеличившее безразмерную аксиальную скорость потока возле центрального вытеснителя, сохраняется. Безразмерная скорость в данной области возрастает с 1,1—1,4 до 1,2—1,6.

В двух областях низкой аксиальной скорости потока возле граней чехла ТВС, параллель-

ных пластинам узла крепления твэлов, выявлено влияние пластин дистанционирующей решетки на движение потока. В области, где пластины решетки не затесняют проходное сечение, безразмерная аксиальная скорость 0,9—1, в области, где пластины создают дополнительное сопротивление движению потока, 0,7—0,8. Воздействие пластин дистанционирующей решетки начинает проявляться еще на входе потока в нее.

При движении потока между первой и второй дистанционирующей решеткой наблюдается выравнивание поля аксиальной скорости между регулярными ячейками и ячейками возле центрального вытеснителя. Безразмерная скорость в них составляла 0,9—1,1 (рис. 4). Однако во всех периферийных ячейках наблюдается замедление потока возле граней чехла ТВС, безразмерная аксиальная скорость в этих ячейках ниже, чем в регулярных, и составляла 0,7—0,8.

Выводы. Неоднородность аксиального потока на входе в активную часть твэльного пучка ТВС обусловлена сложной геометрией входного участка с большим числом последовательно установленных элементов, таких, как дроссельная шайба, ребра жесткости шарикового замка и диффузора, а также пластин узла крепления твэлов к диффузору.

Изменение проходного сечения дроссельной шайбы при повороте ее дисков привело к образованию струйных течений с высокой безразмерной аксиальной скоростью 1,8—2,2. Струйные течения из отверстий шайбы оказывают значительное влияние на движение потока вплоть до середины пролета пучка твэлов между первой и второй дистанционирующей решеткой.

Области низкой аксиальной скорости потока на периферии пучка твэлов сохраняются до

середины пролета пучка твэлов между первой и второй дистанционирующей решеткой. Безразмерная скорость в этих областях на входе в активную часть твэльного пучка составляет 0,2—0,5, за первой дистанционирующей решеткой — 0,7—1. В пучке твэлов между дистанционирующими решетками фиксируется замедление потока вблизи всей поверхности чехла ТВС, безразмерная аксиальная скорость составила 0,7—0,8.

Таким образом, влияние неоднородности потока на входе в ТВС распространяется до середины пролета пучка твэлов между первой и второй дистанционирующей решеткой. Далее определяющее влияние на структуру аксиального потока оказывают конструкция дистанционирующих решеток, геометрия твэльного пучка и чехол ТВС.

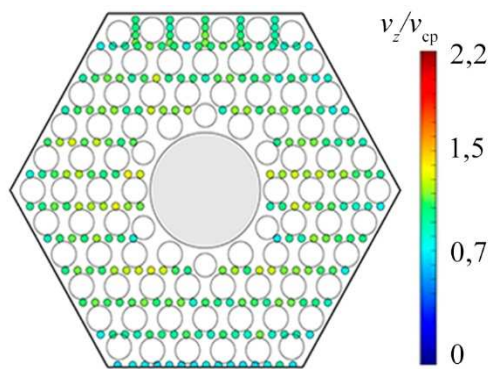
Выявленную неоднородность аксиального потока необходимо учитывать при расчетном обосновании теплотехнической надежности активной зоны с использованием теплогидравлических полей кодов, к которым относится код КАНАЛ.

Для выравнивания поля аксиальной скорости потока на входе в активную часть пучка твэлов необходимо провести дополнительные научные и конструкторские работы, направленные на оптимизацию формы проточной части шарикового замка и диффузора, а также разработать новую конструкцию поглощающей решетки, которая должна обеспечивать вытеснение части аксиального потока из центра твэльного пучка на периферию. Этого можно достичь за счет установки дополнительных ребер в центральной части решетки и исключения ребер на периферии.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрунин В.В., Шешина Н.В., Фатеев С.А. и др. Научно-технические аспекты создания инновационной реакторной установки РИТМ-200Н для АСММ. — Атомная энергия, 2023, т. 134, вып. 1—2, с. 3—10.
2. Романов А.И., Папотин В.Ю., Тутуркин М.Ю. Разработка активных зон для АСММ и ПЭБ. Текущее состояние и направления развития. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2023, вып. 5, с. 86—111.



Р и с. 4. Безразмерная аксиальная скорость потока в активной части пучка твэлов перед второй дистанционирующей решеткой

3. **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.
4. **Дмитриев С.М., Самойлов О.Б., Куприянов А.В., Осин А.Б.** Экспериментальные исследования возникновения и развития кризиса теплоотдачи в модели ТВС полномасштабного сечения реактора РИТМ-200 для АСММ. — Атомная энергия, 2022, т. 133, вып. 1, с. 30—33.
5. **Дмитриев С.М., Баринев 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.
6. **Дмитриев С.М., Баринев 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.
7. **Дмитриев С.М., Баринев А.А., Добров А.А. и др.** Экспериментальные исследования процессов турбулентного смешения в основном оборудовании ЯЭУ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2018, вып. 3, с. 120—126.

Поступила в Редакцию 26.02.24

УДК 621.039.546:621.039.542.34

ЗАВЕРШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТВЭЛОВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЛАВУЧЕЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ «АКАДЕМИК ЛОМОНОСОВ»

*Кулаков Г.В., Коновалов Ю.В., Ватулин А.В., Косауров А.А., Ершов С.А., Майников Е.В.,
Сорокин В.И., Козлов А.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: gevkulakov@bochvar.ru*

Актуальность разработки АСММ определяется экономической целесообразностью и перспективами их использования в труднодоступных районах. Атомные станции малой мощности предполагается использовать в качестве перспективного энергоисточника в регионах с децентрализованным электроснабжением.

Активная зона транспортного типа реактора АСММ должна удовлетворять некоторым специфическим требованиям по сравнению с энергетическим реактором стационарного типа. Прежде всего она должна обладать существенно большей маневренностью. К ней предъявляются повышенные требования надежности и безопасности, в том числе в условиях максимальной проектной аварии. Она неремонтопригодна — не предусматривается перегрузка отдельных ТВС при их отказе, что предполагает необходимость длительной работы при разгерметизации отдельных ТВЭлов, например, технологического характера без значительного роста активности теплоносителя.

Эти требования достигаются применением ТВЭлов дисперсионного типа. Отработанная технология их изготовления позволяет обеспечивать относительно высокую ураноемкость топливной композиции и сердечника, применять различное ядерное топливо, а также оболочки

разной формы из разных материалов. Она и была выбрана для изготовления ТВЭлов активных зон нового поколения атомных ледоколов и АСММ.

Плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов» представляет собой автономный энергетический объект — плавучий энергоблок, который создается на судостроительном заводе и затем буксируется морским или речным транспортом к месту эксплуатации.

Реакторная установка КЛТ-40С разработана АО «ОКБМ Африкантов» как модернизированная КЛТ-40. В частности, активная зона 14-14 является кассетной, увеличена длина активной части ТВЭлов (рис. 1) [1—3].

Основные требования, предъявляемые к ТВЭлам головного плавучего энергоблока, следующие: обогащение ядерного топлива не более 20%, максимальная линейная нагрузка на ТВЭл не выше 282 Вт/см, плотность продуктов деления в топливной композиции (выгорание) до 0,72 г/см³ [3]. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют ТВЭлы дисперсионного типа транспортных реакторов, разработанные АО «ВНИИНМ» и хорошо зарекомендовавшие себя в активных зонах атомных ледоколов, так как они наиболее близки к активным зонам плавучего энергоблока по основным эксплуатационным характеристикам.