

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., 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.
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.
7. **Дмитриев С.М., Баринов 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.

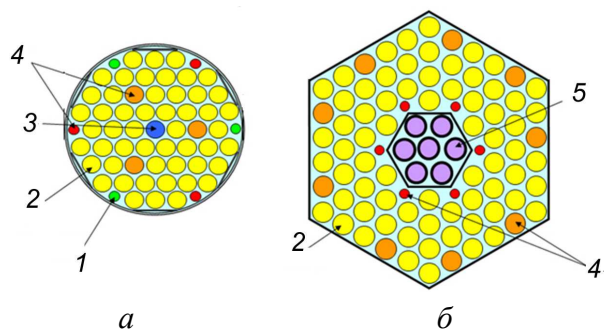
Эти требования достигаются применением ТВЭлов дисперсионного типа. Отработанная технология их изготовления позволяет обеспечивать относительно высокую ураноемкость топливной композиции и сердечника, применять различное ядерное топливо, а также оболочки

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.



Р и с. 1. Поперечное сечение ТВС ледокольной активной зоны 14-10-3М канального типа (а) и кассетной активной зоны 14-14 с КЛТ-40С плавучей атомной тепловыделяющей установкой «Академик Ломоносов» (б): 1 — стойки дистанционирующих решеток; 2 — твэл; 3 — рабочий источник нейтронов; 4 — стержень выгорающего поглотителя; 5 — поглощающий элемент

Топливная композиция в твэлах атомных ледоколов в сердечнике твэла не может обеспечить загрузку урана, необходимую для выполнения требований по энергоресурсу при низком обогащении топлива. Поэтому в АО «ВНИИНМ» были разработаны твэлы на основе топливной композиции диоксид урана + алюминиевый сплав, обладающей существенно большей ураноемкостью и радиационной стойкостью, приемлемым распуханием, коррозионно-эрозионной стойкостью, обеспечивающей относительно низкий и контролируемый рост активности теплоносителя первого контура при разгерметизации твэлов. Диоксид урана совместим с большинством конструкционных материалов при рабочей температуре, имеет высокую радиационную стойкость, приемлемое распухание, коррозионно-эрозионную стойкость, а также технологичность, обеспечивающую получение качественных дисперсионных сердечников для твэлов разных конструкций. Невысокая теплопроводность диоксида урана компенсируется высокой теплопроводностью матрицы.

В качестве матрицы используется алюминиевый сплав, который применяется в дисперсионных твэлах транспортных реакторов, обладает удовлетворительной совместимостью с разными топливными и конструкционными материалами, высокой теплопроводностью и относительно малым сечением захвата нейтронов, высокой жидкотекучестью, коррозионной стойкостью, минимальной усадкой.

В качестве материала оболочки используется циркониевый сплав Э110, широко применяемый в качестве материала оболочек твэлов

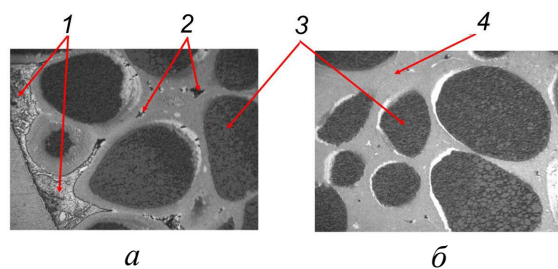
атомных ледоколов. Были опробованы, в том числе и при облучении другие циркониевые сплавы, в частности, сплав Э635 и модернизированные Э110М и Э635М (несколько модификаций), но они не показали существенных преимуществ по сравнению со сплавом Э110. Для повышения загрузки топлива был увеличен внешний диаметр твэлов при сохранении толщины оболочки. Твэлы имели цилиндрическую форму. Дистанционирование твэлов осуществлялось с помощью решеток.

Дореакторные исследования. Для обоснования постановки твэлов на облучение в реактор были проведены исследования, которые включали длительные термические испытания при 500 и 550 °С, термические испытания при кратковременном нагреве до 800 °С и термоциклические испытания, которые сопровождались измерением размера и массы твэлов, металлографическими исследованиями макро- и микроструктуры топливного сердечника, а также определением теплопроводности топлива и оценками ее изменения.

Дореакторные исследования показали возможность постановки разработанных твэлов на облучение в реактор в составе опытных укороченных сборок (блоков) и полноразмерных ТВС.

Реакторные испытания. Их проводили в реакторе МИР АО «ГНЦ НИИАР». В настоящее время завершены испытания восьми блоков укороченных твэлов и двух полномасштабных ТВС. Максимальная достигнутая плотность продуктов деления в топливе составила 1,05 г/см³.

Послереакторные исследования. Они подтвердили высокую работоспособность твэлов (рис. 2). Наблюдается взаимодействие разной интенсивности диоксида урана с матрицей с



Р и с. 2. Микроструктура облученной топливной композиции диоксид урана + алюминиевый сплав вблизи оболочки (а) и в центре сердечника (б): 1 — силумин; 2 — поры в матрице; 3 — диоксид урана; 4 — интерметаллид урана

образованием интерметаллидов урана типа UAl_x . Степень взаимодействия увеличивается с ростом накопления продуктов деления, теплового потока и плотности урана в топливной композиции. Алюминиевая матрица сохраняется только вблизи границы оболочка—сердечник. Диффузионный слой взаимодействия на границе оболочка—сердечник не изменяется, сохраняется металлургическое сцепление оболочки с сердечником.

Дореакторными, реакторными испытаниями и послереакторными исследованиями твэлов с топливной композицией диоксид урана + алюминевый сплав была показана перспективность их применения в активной зоне плавучего энергоблока и АСММ.

Эксплуатация. Практическое подтверждение возможности использования низкообогащенного топлива в условиях действующих реакторов получено в составе реакторных установок КЛТ-40С головного плавучего энергоблока «Академик Ломоносов», который после постройки в АО «Балтийский завод» и загрузки активных зон в ФГУП «Атомфлот» был доставлен для эксплуатации в г. Певек (рис. 3). В 2020 г. плавучая атомная теплоэлектростанция была введена в промышленную эксплуатацию.

В ходе эксплуатации плавучей теплоэлектростанции АО «ВНИИНМ» обосновал продление ресурса и срока службы твэлов.

В июле 2023 г. успешно завершена эксплуатация головной активной зоны в составе реакторной установки № 1 с энерговыработкой 1,98 ТВт·ч. Показатели радиационной безопас-



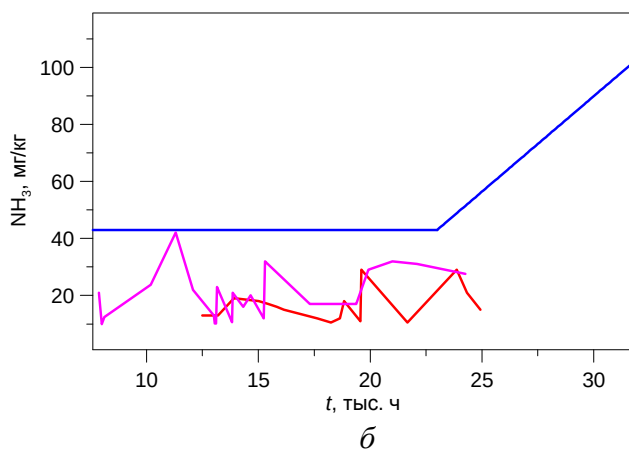
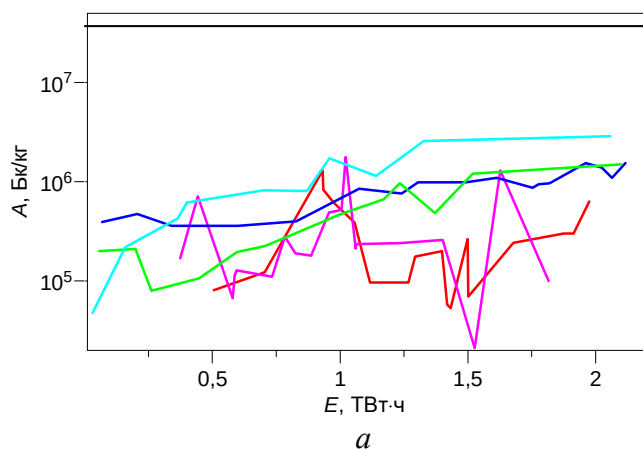
Р и с. 3. Плавучая атомная электростанция «Академик Ломоносов» в г. Певек

ности в норме. После выгрузки первой (головной) активной зоны из РУ-1 в реактор установлена третья по порядку изготовления активная зона 14-14, однотипная с выгруженной, и реакторная установка № 1 в декабре 2023 г. вновь введена в действие.

Продолжается эксплуатация второй реакторной установки. Ее энерговыработка на 31 января 2024 г. составила 1,83 ТВт·ч.

Контроль активности теплоносителя показывает отсутствие разгерметизации оболочек твэлов (рис. 4, а). Концентрация аммиака в теплоносителе составляет около 20 мг/кг, что свидетельствует об отсутствии язвенной коррозии оболочек твэлов из циркониевого сплава Э-110 (см. рис. 4, б).

Эксплуатация продолжается. Назначенный срок службы установки 40 лет. Плавучий энергоблок эксплуатируется на площадке периодами по 10—12 лет, в промежутках между ними транспортируется на специализированное предприятие для ремонта.



Р и с. 4. Зависимость активности теплоносителя по сумме изотопов иода от энерговыработки реакторных установок РУ-1 (—), РУ-2 (—) в сравнении с характерными ледокольными активными зонами (—, —, —) (а) и концентрации аммиака в теплоносителе первого контура от времени работы на мощности РУ-1 (—), РУ-2 (—) в сравнении с характерными ледокольными активными зонами (—) (б); — — допустимая концентрация

Перспективы разработки атомных станций малой мощности. В настоящее время разработаны твэлы для наземной реакторной установки РИТМ-200Н с активной зоной АС-14-15 [4—6], плавучего энергоблока РИТМ-200М с активной зоной АС-14-19 [7].

Ближайшие перспективы связаны с разработкой твэлов для реакторной установки оптимизированного плавучего энергоблока северного и южного исполнения, реакторной установки Шельф-М наземного и подводного размещения [8, 9], реакторной установки теплоснабжения «Елена».

Заключение. Эксплуатация головной активной зоны в составе реакторной установки № 1 плавучей теплоэлектростанции «Академик Ломоносов» успешно завершилась. Показатели радиационной безопасности находятся в норме. Активная зона снабжена твэлами, разработанными АО «ВНИИНМ». Реакторные испытания, послереакторные исследования, результаты эксплуатации подтвердили их работоспособность и перспективы использования в активных зонах АСММ.

Атомные станции малой мощности являются удачным решением их использования в труднодоступных регионах.

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. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А. и др. Поведение под облучением твэлов плавучих энергоблоков. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2016, вып. 4(87), с. 6—12.
3. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А. и др. Разработка топлива для атомных станций малой мощности и плавучих энергоблоков, состояние и перспективы. — Там же, 2020, вып. 1(102), с. 116—128.
4. Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др. Обликовый проект АСММ с реакторной установкой РИТМ-200. — Атомная энергия, 2018, т. 125, вып. 6, с. 323—326.
5. Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др. Плавучие энергоблоки с РУ РИТМ-200М. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 1, с. 91—96.
6. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А. и др. Разработка тепловыделяющих элементов для атомных станций малой мощности. — Там же. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2021, вып. 2(108), с. 103—112.
7. 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.
8. Андреева Л.А., Гольцов Е.Н., Каплиенко А.В. и др. Актуальные задачи развития объектов малой энергетики. АСММ на базе реакторной установки Шельф-М. — Там же, 2020, т. 129, вып. 4, с. 204—210.
9. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А. и др. Обоснование конструкции и материалов компонентов твэлов атомных станций мощностью не выше 10 МВт. — Там же, 2021, вып. 130, т. 6, с. 310—313.

Поступила в Редакцию 19.02.24

УДК 621.039.546:621.039.542.34

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО УРАН-МОЛИБДЕНОВОГО ТОПЛИВА В АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРАХ

Савченко А.М., Коновалов Ю.В., Кулаков Г.В., Тарасов Б.А., Ершов С.А.,
Майников Е.В., Бубеничиков Д.А. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: sav-alex111@mail.ru

Одним из направлений международной программы RERTT — нераспространение ядерных материалов является разработка низкообогащенного топлива для исследовательских реакторов, в частности, построенных в третьих странах по американским и отечественным проектам. Применение низкообогащенного топлива (до 20% ^{235}U) возможно при переходе к более ураноемкому [1—3].

Постепенный переход с интерметаллидного топлива типа UAl_3 — UAl_4 на диоксидное UO_2 , затем на дисилицидное U_3Si_2 позволил достичь 3,5 и 4 г урана соответственно в 1 см³ топливной композиции по сравнению с 2 г, что в некоторых исследовательских реакторах снизило обогащение топлива до 19,75%. Однако для другой части реакторов, в частности, наиболее эффективных высокопоточных этого оказалось недо-