

УДК 621.039.5

**РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ РАЗРАБОТКИ ОАО «ОКБМ АФРИКАНТОВ»
ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ***Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Гуреева Л.В., Скородумов С.Е.
(ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)*

По данным МАГАТЭ сегодня имеется более 60 проектов и концепций атомных станций малой и средней мощности. Эти проекты характеризуются разной степенью готовности к реализации, но единой направленностью — быстрая реакция на рыночный спрос.

К числу основных требований для атомных станций малой и средней мощности, в том числе с учетом рекомендаций МАГАТЭ следует отнести гарантированный уровень безопасности и экологичности, позволяющий без неприемлемого риска приблизить атомную станцию к потребителям, высокую маневренность для гибкого отслеживания потребности локального потребителя, гарантированное обеспечение режима нераспространения, простоту и надежность в эксплуатации за счет упрощения систем и высокой степени автоматизации, минимизацию объема обслуживания — переход на сервисное обслуживание, модульный подход в конструкции реакторной установки и технологии сооружения энергоблока, дающий возможность радикально сократить сроки сооружения путем использования реакторных модулей и укрупненных строительных конструкций заводского изготовления, гибкое изменение состава и конструкции модулей в зависимости от требований заказчика.

Дополнительными специфическими требованиями к атомным станциям малой и средней мощности являются возможность расширения областей применения энергоисточника, помимо производства электричества, получение тепловой энергии, опреснение морской воды, производство водорода, возможность многоцелевого использования в составе различных объектов (суда, плавучие и наземные атомные станции, буровые платформы и др.), а также минимальная зависимость от наличия высокотехнологичной инфраструктуры и квалифицированной рабочей силы в районе размещения. Кроме того, решающим аргументом для потребителя является опыт успешного создания и эксплуатации демонстрационного (прототипного) объекта.

Технической основой создания таких станций на ближайшую перспективу является освоение технологий транспортных ядерных реакторов (опыт эксплуатации более 460 реакторов с общим сроком службы более 6500 реакторолет), опыт эксплуатации ВВЭР, разработка и лицензирование реактора КЛТ-40С плавучей атомной теплоэлектростанции, а также разработки проектов атомных станций теплоснабжения крупных городов (АСТ-500).

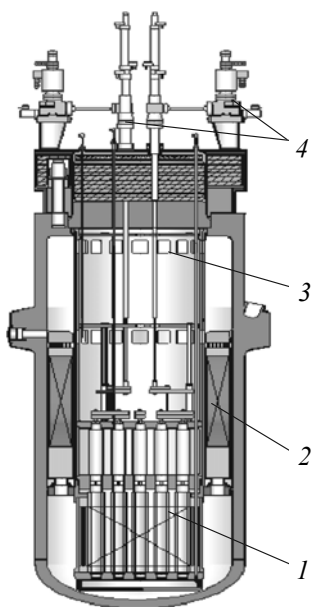
В настоящее время ОАО «ОКБМ Африкантов» разработаны проекты реакторных установок, наиболее подходящих для такого вида энергоисточников, — АБВ, КЛТ-40С, РИТМ-200 и ВБЭР-300. Наряду с традиционным направлением реакторов с водой под давлением ОАО «ОКБМ Африкантов» активно развивает перспективное направление газоохлаждаемых реакторов ГТ-МГР, в том числе и для малой энергетики.

Рассмотрим особенности проектов реакторных установок, обладающих наибольшими перспективами реализуемости в настоящее время.

Реакторная установка АБВ. Она представляет собой установку с реактором интегрального типа и 100%-ной естественной циркуляцией первого контура, с встроенной парогазовой системой компенсации для наземных и плавучих атомных станций.

Водоохлаждаемый реактор АБВ-6 тепловой мощностью 38, электрической 8,6 МВт с развитыми свойствами саморегулирования и самозащищенности работает без перегрузки активной зоны в течение 12 лет и не требует специального технического обслуживания на месте эксплуатации в период непрерывной работы между перегрузками (рис. 1). При этом обеспечивается недоступность ядерных материалов. В реакторной установке АБВ применена кассетная активная зона с керметным топливом высокой ураноемкости при низком обогащении (не более 20%).

Основное оборудование АБВ скомпоновано в единый парогенерирующий блок на баке металловодной защиты. Безопасность обеспечивается за счет развитых внутренне присущих

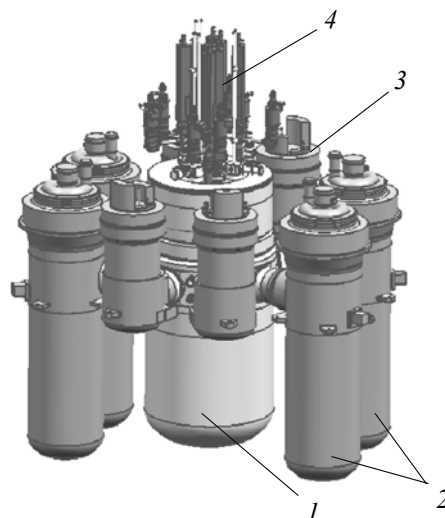


Р и с. 1. Общий вид парогенерирующего блока АБВ-6: 1 — активная зона; 2 — парогенератор; 3 — компенсатор давления; 4 — приводы системы управления и защиты

свойств самозащищенности и применения систем пассивного принципа действия. Установка сооружается агрегатным способом (сборка в блоки или агрегаты на предприятии-изготовителе), что ведет к сокращению объема сборочных работ при монтаже и сроков строительства. На основе базовой установки АБВ-6 предусмотрено создание унифицированных реакторных установок, перекрывающих диапазон мощности 4—18 МВт.

Благодаря компактности и широкому диапазону перекрываемой мощности реакторная установка АБВ может быть использована в качестве энергоисточника для транспортных судов различного назначения, промышленных баз, плавучих станций для тепло- и электроснабжения потребителей в прибрежной зоне, энергоопреснительных комплексов, наземных станций для автономного энергоснабжения труднодоступных районов, автономного энергоснабжения морских нефтедобывающих платформ, энергоснабжения подводных буровых платформ и танкеров.

Реакторная установка КЛТ-40С. Ее тепловая мощность 150, электрическая 35 МВт. Она представляет собой дальнейшее развитие реакторных установок атомных ледоколов и морского лихтеровоза «Севморпуть». Реакторная установка базируется на освоенном парогенерирующем блоке с блочным типом компоновки при принудительной циркуляции теплоносителя в первом контуре (рис. 2). Основные компоненты



Р и с. 2. Общий вид парогенерирующего блока реакторной установки КЛТ-40С: 1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — циркуляционный насос первого контура; 4 — приводы системы управления и защиты

установки модернизированы методом устранения «слабых звеньев» для повышения их надежности, увеличения ресурса (300 тыс. ч), срока службы (40 лет) и улучшения условий технического обслуживания. Системы безопасности доведены до требований современной нормативной документации. Кассетная активная зона энергоресурсом 3,1 ТВт·ч обеспечит период между перегрузками до 3 лет.

Все оборудование для преобразования энергии (две реакторные, две паротурбинные установки, электроэнергетическая установка) расположено на плавучем энергоблоке — важнейшей части плавучей атомной станции. Плавучий энергоблок обеспечивает выдачу потребителю 2×35 МВт электроэнергии. Наряду с выработкой электроэнергии имеется возможность выдачи тепловой энергии до 2×73 Гкал/ч при соответствующем снижении электрической мощности. Важной особенностью плавучего энергоблока с КЛТ-40С является наличие на его борту хранилища, рассчитанного на три комплекта отработавших активных зон, и перегрузочного оборудования для перезарядки реакторов плавучего энергоблока в пункте базирования. Это позволяет обеспечить эксплуатацию до среднего ремонта (через 12 лет).

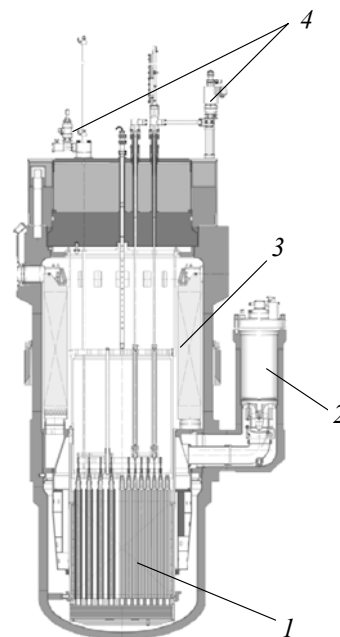
Во время нахождения плавучего энергоблока в пункте базирования все работы по обращению с топливом, включая перезарядку, и радиоактивными отходами проводятся только на нем. Эксплуатация и обслуживание осуществляются

вахтовым методом персоналом, проживающим на борту.

В настоящее время в ОАО «Балтийский завод» ведется строительство головного плавучего энергоблока малой мощности с двумя реакторными установками КЛТ-40С. Корпус плавучего энергоблока спущен на воду в июне 2010 г., ведется его насыщение энергетическим оборудованием, завершено формирование обоих парогенерирующих блоков. ОАО «ОКБМ Африкантов» завершило комплектную поставку оборудования двух реакторных установок. Значительная часть оборудования изготовлена в ОАО «ОКБМ Африкантов».

Реакторная установка РИТМ-200. Ее тепловая мощность 175, электрическая 36 МВт. Она разрабатывалась для ядерной энергетической установки универсального атомного ледокола нового поколения, призванного заменить действующие линейные и мелкосидящие атомные ледоколы по мере выработки их ресурса. В ее основу положен парогенерирующий блок интегрального типа с принудительной циркуляцией, расположением кассет парогенератора внутри единого корпуса, циркуляционных насосов первого контура — в отдельных выносных гидрокameraх и низконапряженной кассетной активной зоной с увеличенным энергоресурсом (рис. 3). Обогащение топлива ^{235}U не превышает 20%. Интегральная компоновка парогенерирующего блока позволила минимизировать массу и габариты реакторной установки в защитной оболочке и реализовать концепцию двухосадочности нового ледокола. Повышен радиационный ресурс корпуса парогенерирующего блока благодаря снижению флюенса нейтронов на корпус с $1,5 \cdot 10^{20}$ до $5,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ при увеличенном сроке службы. За счет увеличения периода между перегрузками до 7 лет и внедрения системы безотходной технологии существенно снижен объем радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации. Парогенерирующий блок транспортируется в полной заводской готовности по железной дороге.

Технический проект РИТМ-200 завершен в 2009 г., получено положительное экспертное заключение на материалы, обосновывающие безопасность ядерной энергетической установки универсального атомного ледокола. В 2010 г. ОАО «ОКБМ Африкантов» в инициативном порядке разработало рабочую конструкторскую документацию оборудования реакторной уста-



Р и с. 3. Общий вид парогенерирующего блока реакторной установки РИТМ-200: 1 — активная зона; 2 — циркуляционный насос первого контура; 3 — парогенератор; 4 — приводы системы управления и защиты

новки с длительным циклом изготовления (корпус парогенерирующего блока и кассеты парогенератора) для быстрого запуска в производство.

Учитывая увеличенный по сравнению с КЛТ-40С энергоресурс активной зоны и более компактное расположение в защитной оболочке, принято решение на базе РИТМ-200 создать реакторную установку для плавучего энергоблока нового поколения.

Реакторная установка РИТМ-200М для плавучего энергоблока является модификацией РИТМ-200. Основными требованиями заказчика, предъявляемыми к реакторной установке для нового плавучего энергоблока, являются увеличение до 10 лет периода между перегрузками путем их совмещения с заводским ремонтом на специализированном предприятии, повышение выдаваемой потребителю электрической мощности до 2×50 МВт. Для выполнения указанных требований потребуется наращивание энергозапаса активной зоны до 10 ТВт·ч при использовании топливной композиции обогащением ^{235}U не более 20%, а также оптимизация параметров первого и второго контуров для повышения коэффициента полезного действия и мощности турбины. Как ожидается, реализуемые мероприятия позволят сократить объемы хранения облученного ядерного топлива и затраты на

хранилище, снизить затраты на обращение с топливом, а также себестоимость вырабатываемой электроэнергии на 10—15%.

Технический проект РИТМ-200М планируется разработать в 2011—2012 гг., одновременно начнутся опытно-конструкторские работы по оборудованию реакторной установки и активной зоне, а также разработка документации, обосновывающей безопасность.

Реакторная установка ВБЭР-300. Она относится к установкам средней мощности и предназначена для потребностей региональной энергетики, в том числе и для замещения тепловых электростанций, выработавших назначенный ресурс.

В составе реакторной установки ВБЭР-300 тепловой мощностью 917, электрической 325 МВт блочный реактор, в котором максимально используются проверенные технические решения на основе опыта судового реакторостроения и водо-водяных энергетических реакторов (рис. 4). В проекте сокращено количество жидких радиоактивных отходов за счет «сухого» способа перегрузки, отсутствия протечек, минимального водообмена в процессе кампании, ремонтпригодности без вскрытия полостей первого контура. Исключены классы наиболее опасных аварий больших и средних течей первого контура, упрощены системы безопасности. В тяжелых запроектных авариях с плавлением активной зоны расплав удерживается в пределах корпуса реактора. Применена технология мон-

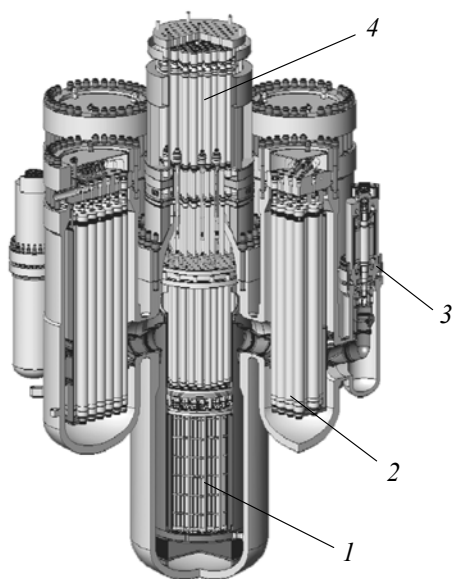
тажа оборудования с использованием укрупненной сборки и модулей заводского изготовления, продолжительность строительства головного блока (от первого бетона) составляет менее 48 мес. Оборудование реакторной установки может изготавливаться в ОАО «Ижорские заводы» параллельно с оборудованием реакторов АЭС-2006, а также на предприятиях, входящих в кооперацию по судовым реакторным установкам, с минимальным количеством технологических пересечений.

На базе унифицированных технических решений возможно создание энергоблоков единичной электрической мощностью от 150 до 600 МВт. Во всех модификациях используются аналогичные технические решения по основному оборудованию — парогенераторам, главным циркуляционным насосам, блоку корпусов реактора. При этом мощность реакторных установок изменяется путем уменьшения/увеличения числа модулей парогенератор—главный циркуляционный насос.

Планируется, что проект ВБЭР-300 будет разрабатываться совместно с АО «КРКАС» (казахстанско-российское предприятие, созданное на паритетных началах АО «НАК «Казатомпром» и ЗАО «Атомстройэкспорт»). В 2008 г. выполнено технико-экономическое обоснование инвестиций сооружения двухблочной атомной станции с ВБЭР-300 в г. Актау Мангистауской области Республики Казахстан.

В 2008—2010 гг. ОАО «ОКБМ Африкантов» по договору с проектно-конструкторским филиалом ОАО «Концерн Росэнергоатом» выполнило комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по проекту атомной станции с ВБЭР-600, включая эскизный проект реакторной установки, расчетно-конструкторские работы по турбоустановке, проектные работы по энергоблоку и двухблочной атомной электростанции.

Реакторные установки ГТ-МГР. Основными преимуществами данных реакторных установок являются компоновка оборудования в энергомодуль с упрощением и минимизацией числа оборудования и систем, следовательно, капитальных и эксплуатационных затрат, возможность создания установок электрической мощностью от 0,5 до 300 МВт и применения как в крупномасштабной, так и в региональной энергетике, производство высокопотенциального тепла (до 950 °С) для замещения органическо-



Р и с. 4. Общий вид парогенирующего блока реакторной установки ВБЭР-300: 1 — активная зона; 2 — циркуляционный насос первого контура; 3 — парогенератор; 4 — приводы системы управления и защиты

го топлива в энергоемких технологических производствах: водород, нефтехимия и нефтепереработка, производство удобрений и синтетического топлива из угля, выработка электроэнергии с высоким коэффициентом полезного действия (до 50%) и низкими тепловыми сбросами в окружающую среду, комбинированного производства электроэнергии и коммунального тепла.

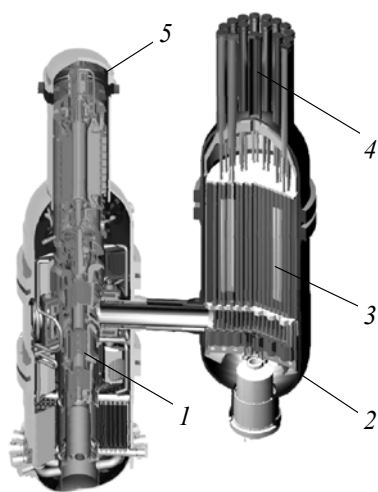
В настоящее время в рамках развития направления газоохлаждаемых реакторов для малой энергетики выполнены концептуальные проработки прототипной реакторной установки малой мощности МГР-100 с модульным гелиевым реактором и на ее основе энергоисточников для различного энерготехнологического применения. Энергетическая часть максимально унифицирована и представляет собой энергоблок, включающий реактор с единичной тепловой мощностью 215 МВт и в зависимости от назначения газотурбинный блок преобразования энергии для производства электроэнергии и (или) блоки теплообменного оборудования (рис. 5). Технологическая часть МГР-100 в зависимости от назначения представляет собой установку для получения водорода или контуры высокотемпературного теплоснабжения для разных промышленных производств.

По проекту предусмотрен комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по следующим направлениям: отработка технологии изготовления микро топлива, совершенствование

конструкции гелиевых турбин и компрессоров в целях повышения эффективности и уменьшения массогабаритных показателей, совершенствование конструкции высокотемпературного теплообменного оборудования, оптимизация параметров газотурбинного цикла для повышения коэффициента полезного действия установки, разработка и внедрение новых теплоустойчивых конструкционных материалов, в том числе на основе нанотехнологий, разработка и внедрение новой нормативной базы использования реакторов данного типа как в электроэнергетике, так и в промышленном производстве.

Заключение. ОАО «ОКБМ Африкантов» в содружестве с генеральными проектантами (ОАО ЦКБ «Айсберг», ОАО «СПбАЭП», ОАО «НИАЭП» и др.) предлагает много проектов наземных и плавучих атомных станций в диапазоне малых и средних мощностей. В их числе проекты на основе технологий атомного судостроения — с реакторными установками типа АБВ, КЛТ-40С, РИТМ, ВБЭР. Это эффективный класс энергоисточников для решения актуальных проблем снабжения электроэнергией, бытовым и промышленным теплом, пресной водой. Проекты реакторных установок имеют высокую степень обоснованности и отвечают современным требованиям по безопасности, обеспечивают привлекательные технико-экономические показатели. Это — продукция с высоким экспортным потенциалом.

Развивается направление инновационных высокотемпературных газовых реакторов, способных в будущем стать основными энергоисточниками в различных областях промышленности (выработка электроэнергии и коммунального тепла, получение высокопотенциального тепла и пара для технологических целей химической промышленности, нефтепереработки и нефтехимии, производства синтетического жидкого топлива из угля, использование в составе энерготехнологических комплексов для производства водорода).



Р и с. 5. Общий вид энергетической части установки МГР-100: 1 — турбомашина; 2 — реактор; 3 — активная зона; 4 — приводы системы управления и защиты; 5 — блок преобразования энергии