

ОСНОВНЫЕ СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РУ РИТМ-200Н НАЗЕМНОЙ АСММ

Семенов М.А., Калинин М.В., Кураченков А.В., Щекин Д.В.
(АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия)

Введение

Сегмент атомных энергоисточников малой мощности представляется одним из направлений развития мировой атомной энергетики, в том числе ввиду востребованности устойчивых источников энергоснабжения на удаленных территориях и территориях с ограниченной сетевой инфраструктурой. Перспективность данного направления подтверждается наличием разработок АСММ у всех значимых игроков на мировом рынке ядерных технологий, включая компании США, Китая, Республики Кореи.

Для атомных станций малой мощности предъявляется ряд специальных требований: компактность, многофункциональность, способность работать в маневренном режиме, стойкость к внешним воздействиям и развитые свойства самозащитенности. Выполненные проработки показали, что решения судовых РУ благодаря данным специфическим свойствам позволяют достичь наиболее высоких технико-экономических показателей и эффективности АСММ.

Реакторные установки типа РИТМ для АСММ

В настоящее время основным направлением создания АСММ в России рассматривается разработка линейки энергоисточников малой мощности на базе РУ РИТМ-200. Указанная установка разработана для универсальных атомных ледоколов (УАЛ) проекта 22220 и прошла полный цикл расчетно-экспериментального обоснования.

По состоянию на 01.01.2022 6 РУ серии РИТМ-200 смонтированы на трех УАЛ «Арктика», «Сибирь» и «Урал». Атомные ледоколы «Арктика» и «Сибирь» введены в эксплуатацию и приняты в состав атомного ледокольного флота.

РУ типа РИТМ-200 могут применяться в составе одно- или двухблочных АСММ как наземного так и плавучего исполнения. АСММ с одной или двумя РУ мощностью ~50 МВт(э) каждая могут использоваться для энергоснабжения промышленных узлов и городов в районах децентрализованного энергоснабжения.

Унифицированные технические решения РУ РИТМ-200 для УАЛ используются в проектах:

- пилотной наземной атомной станции малой мощности (АСММ) – РУ РИТМ-200Н;
- модернизированных плавучих энергоблоков (МПЭБ) с РУ РИТМ-200С;
- перспективного оптимизированного плавучего энергоблока (ОПЭБ) с РУ РИТМ-200М.

Основные проектные положения РУ РИТМ-200Н

За основу РУ РИТМ-200Н взят водо-водяной интегральный реактор РУ РИТМ-200.

Интегральное исполнение характеризуется размещением активной зоны и парогенераторов в едином корпусе и соединением корпуса реактора и гидрокамер главных циркуляционных насосов без трубопроводов главного циркуляционного тракта, путем непосредственной сварки между собой. Такое исполнение не только обеспечивает минимальные массогабаритные характеристики, но и значительно повышает

безопасность реакторной установки в целом, исключая такой класс аварий как большие и средние течи теплоносителя первого контура.

Прямоточные парогенераторы, которые применяются в судовых реакторных установках обеспечивают сокращение массогабаритных характеристик реакторной установки и высокие саморегулирующие свойства реакторной установки за счет обратных связей (температурного и мощностного коэффициентов реактивности), что позволяет упростить систему управления реактором и обеспечить высокую степень самозащищенности реакторной установки в реактивностных и теплоотводных авариях.

РУ РИТМ-200Н базируется на основных референтных технических решениях РУ РИТМ-200, таких как герметичный первый контур. Для обеспечения герметичности первого контура используются герметичные главные циркуляционные насосы, герметичные (в плане отсутствия продувок) парогенераторы, быстродействующая локализирующая пневмоприводная арматура, а также газовая системы компенсации для первого контура и самоподдерживающийся аммиачный водно-химический режим

Особенности компоновки и эксплуатации транспортных установок потребовали и разработки специфического способа перегрузки активных зон транспортных реакторных установок, так называемый «судовой» способ перегрузки без использования машины перегрузочной, а также разработки для этого способа перегрузки специфического контейнерного оборудования.

Компоновка основного оборудования и систем первого контура выполнена на баке металловодной защиты, аналогично судовым реакторным установкам.

Разработка РУ РИТМ-200Н выполняется в соответствии с требованиями НД для наземных АЭС, с учетом конструктивных особенностей судовых РУ. Соответственно при разработке технического проекта РУ для АСММ принят ряд схемно-конструктивных решений по основному оборудованию и системам, включая системы безопасности, учитывающих требования НД для наземных АЭС, при сохранении облика прототипной реакторной установки РИТМ-200.

Основные технические решения РУ РИТМ-200Н для АСММ

АСММ на основе РУ РИТМ-200Н предназначена для энергообеспечения удаленных населенных пунктов и промышленных производств в регионах со слабо развитыми электрическими сетями.

Все оборудование РУ рассчитано с учетом модели эксплуатации энергоблока, работающего в локальной энергосистеме малой мощности.

В настоящее время предприятиями Госкорпорации «Росатом» ведется разработка проекта пилотной АСММ для сооружения в поселке Усть-Куйга Усть-Янского улуса Республики Саха (Якутия). Пилотный проект подразумевает строительство АСММ с реакторной установкой РИТМ-200Н электрической мощностью 55 МВт(э) со сроком ввода в промышленную эксплуатацию в 2028 г.

Основные технические характеристики РУ:

- тепловая мощность 190 МВт
- паропроизводительность 305 т/ч
- температура на выходе из активной зоны 321 °С
- давление в первом контуре 15,7 МПа
- расход теплоносителя первого контура 3250 т/ч
 - температура питательной воды на входе в ПГ 170 °С
 - температура пара на выходе из ПГ 295 °С
- давление пара за ПГ 3,82 МПа (абс.)

Основным элементом реакторной установки является интегральный реактор (ИР). ИР включает в себя активную зону, кассеты парогенератора, а также конструктивные

элементы, обеспечивающие работу активной зоны и формирующие основной циркуляционный тракт первого контура.

В корпусе интегрального реактора размещаются четыре парогенератора. Каждый ПГ состоит из трех кассет, объединенных между собой по питательной воде и пару. Кассета ПГ представляет собой прямоточный, вертикальный, прямотрубный теплообменник поверхностного типа.

В гидрокамеры устанавливаются главные циркуляционные насосы с клапанными коробками. Каждая гидрокамера соединяется с корпусом реактора при помощи коротких патрубков (главных), выполненных по типу «труба в трубе». Патрубки являются силовыми элементами, воспринимающими нагрузку от давления и веса гидрокамеры с ГЦН. В качестве главного циркуляционного насоса применен насос аналогичный РУ РИТМ-200 для универсального атомного ледокола. Тип электронасоса – лопастной, одноступенчатый, вертикального исполнения с консольно-закрепленным колесом осевого типа и герметичным асинхронным однообмоточным электродвигателем с сухим экранированным статором.

На крышке реактора размещены приводы СУЗ, в том числе приводы КГ, перемещающие компенсирующие группы рабочих органов, и приводы АЗ, обеспечивающий ввод в активную зону стержней аварийной защиты.

Общий вид интегрального реактора приведена на рис. 1.

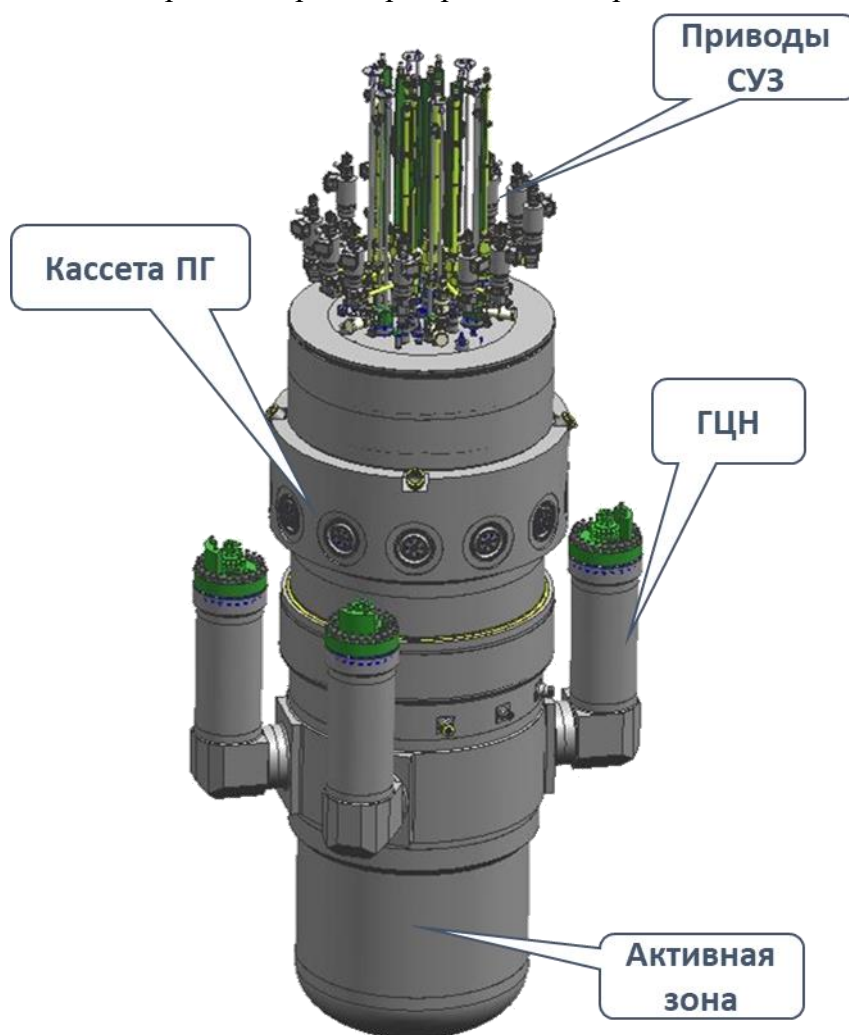


Рис. 1. Интегральный реактор РИТМ-200Н

Интегральный реактор РИТМ-200Н по сравнению с парогенерирующим блоком РИТМ-200 имеет некоторые отличия:

- увеличена высота корпуса и внутрикорпусных устройств в связи увеличения высоты кассет парогенератора и увеличения высоты ТВС;
- увеличена толщина корпуса в районе активной зоны и главных патрубков для увеличения срока службы корпуса;
- в корпусе реактора размещены комплекты образцов-свидетелей для обеспечения эксплуатационного контроля металла корпуса напротив активной зоны;
- увеличено количество средств измерений.

Оборудование и трубопроводы РУ РИТМ-200Н сохраняют работоспособность при землетрясении интенсивностью 8 баллов по шкале MSK-64, а при максимальном расчетном землетрясении интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64, сохраняют способность выполнять функции, связанные с обеспечением безопасности РУ.

Активная зона

Для АСММ используется кассетная активная зона, удовлетворяющая требованиям нераспространения (обогащение по U-235 менее 20 %), на базе ураноемкого металлокерамического топлива UO_2 в силуминовой матрице.

Активная зона представляет собой комплекс тепловыделяющих сборок (ТВС), стержней аварийной защиты (АЗ), пусковых источников нейтронов (ПИН), гильз под термометры, под стержни АЗ, под источник нейтронов и детекторы нейтронно-физического контроля.

Активная зона кассетного типа содержит ТВС, конструктивно аналогичные (за исключением высоты и материала оболочек твэлов) используемым в проекте а.з. для РУ КЛТ-40С. Для оболочек твэлов применен новый коррозионно-стойкий сплав. Коррозионно-стойкий оболочечный сплав прошел обширный комплекс испытаний. Тот же оболочечный сплав применен и для а.з. универсального атомного ледокола.

Активная зона имеет энергоресурс 8 ТВт·ч, что обеспечивает ее непрерывную работу на протяжении 5–6 лет и увеличенный интервал между перегрузками.

Системы безопасности

Для РУ РИТМ-200Н принята двухканальная структура систем, обеспечивающих безопасность. Системы спроектированы с учетом принципов независимости, единичного отказа, резервирования, физического и пространственного разделения, а также принципа безопасного отказа.

Для аварийной остановки реактора предусмотрены две независимые электромеханические системы воздействия на реактивность:

- высокоэффективная система компенсации реактивности, состоящая из 12 рабочих органов компенсирующих групп;
- быстродействующая система аварийной защиты, включающая шесть рабочих органов АЗ.

Система аварийной защиты без наиболее эффективных рабочих АЗ обладает необходимым быстродействием и эффективностью, достаточной для перевода и поддержания активной зоны в "горячем" подкритическом состоянии. Быстродействие системы аварийной защиты достигается вводом рабочих органов АЗ в активную зону под действием разгоняющих пружин при обесточивании удерживающих электромагнитов.

По сигналам АЗ предусмотрено опускание всех рабочих органов КГ под действием собственного веса. Система компенсации реактивности обеспечивает

подкритичность активной зоны в холодном разотравленном состоянии в любой момент компании при зависании наиболее эффективного рабочего органа КГ.

Наряду с электромеханическими системами аварийной защиты и компенсации реактивности предусмотрена также система ввода в реактор жидкого поглотителя. Она предназначена для приведения активной зоны в подкритическое состояние и поддержания ее в этом состоянии в процессе расхолаживания и разотравления, при зависании любых двух РО КГ системы компенсации реактивности. Принципиальная схема систем аварийной остановки реактора представлена на рис. 2.

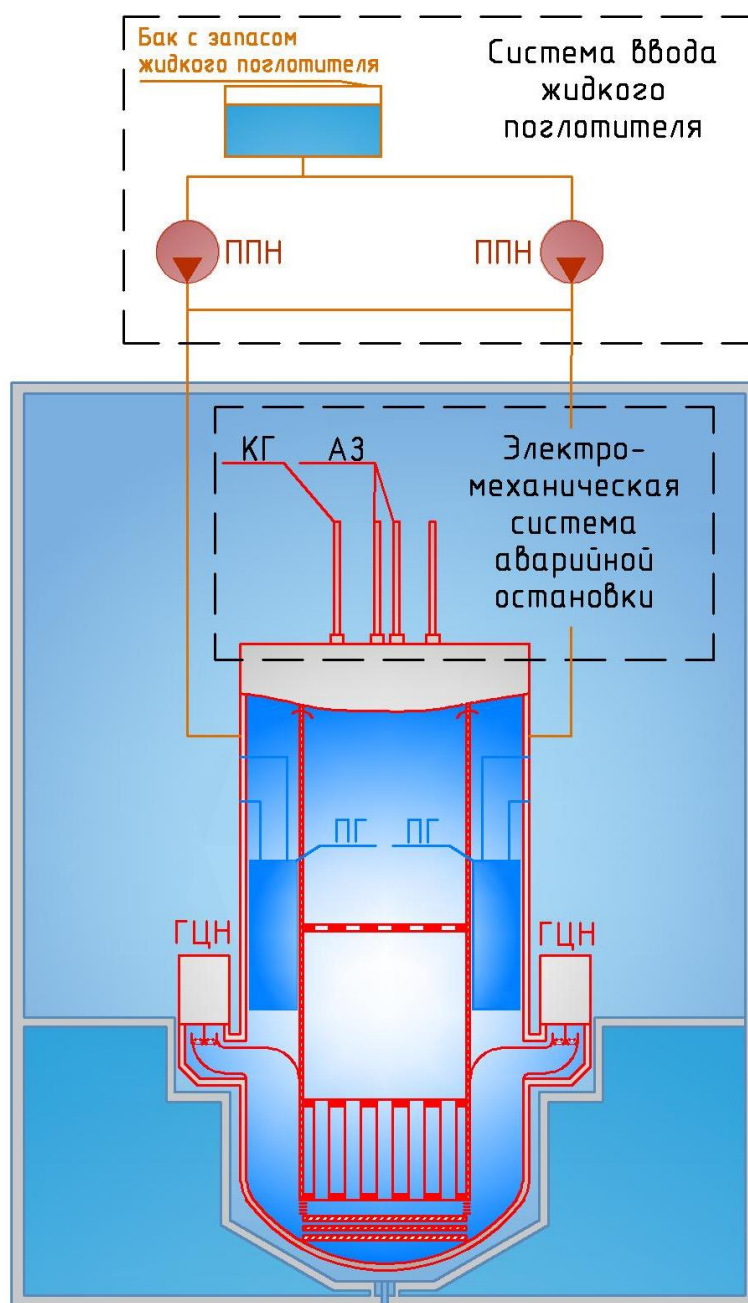


Рис. 2. Принципиальная схема систем аварийной остановки реактора

Отвод остаточных тепловыделений от активной зоны реактора после срабатывания аварийной защиты осуществляется системами аварийного расхолаживания.

Системы аварийного расхолаживания включают:

- технологический конденсатор, обеспечивающий расхолаживание реактора вторым контуром через парогенераторы;
- систему очистки и расхолаживания, обеспечивающую расхолаживание первого контура через теплообменник СОиР.

Каждая из систем является двухканальной, каждый канал системы обеспечивает необходимую эффективность теплоотвода.

Конечным поглотителем тепла для систем аварийного расхолаживания является атмосферный воздух, отвод тепла к которому осуществляется соответствующими обеспечивающими системами.

Системы аварийного расхолаживания используются также для нормального вывода реакторной установки из действия.

Схема активных каналов расхолаживания – через теплообменник СОиР и через технологический конденсатор – представлена на рис. 3.

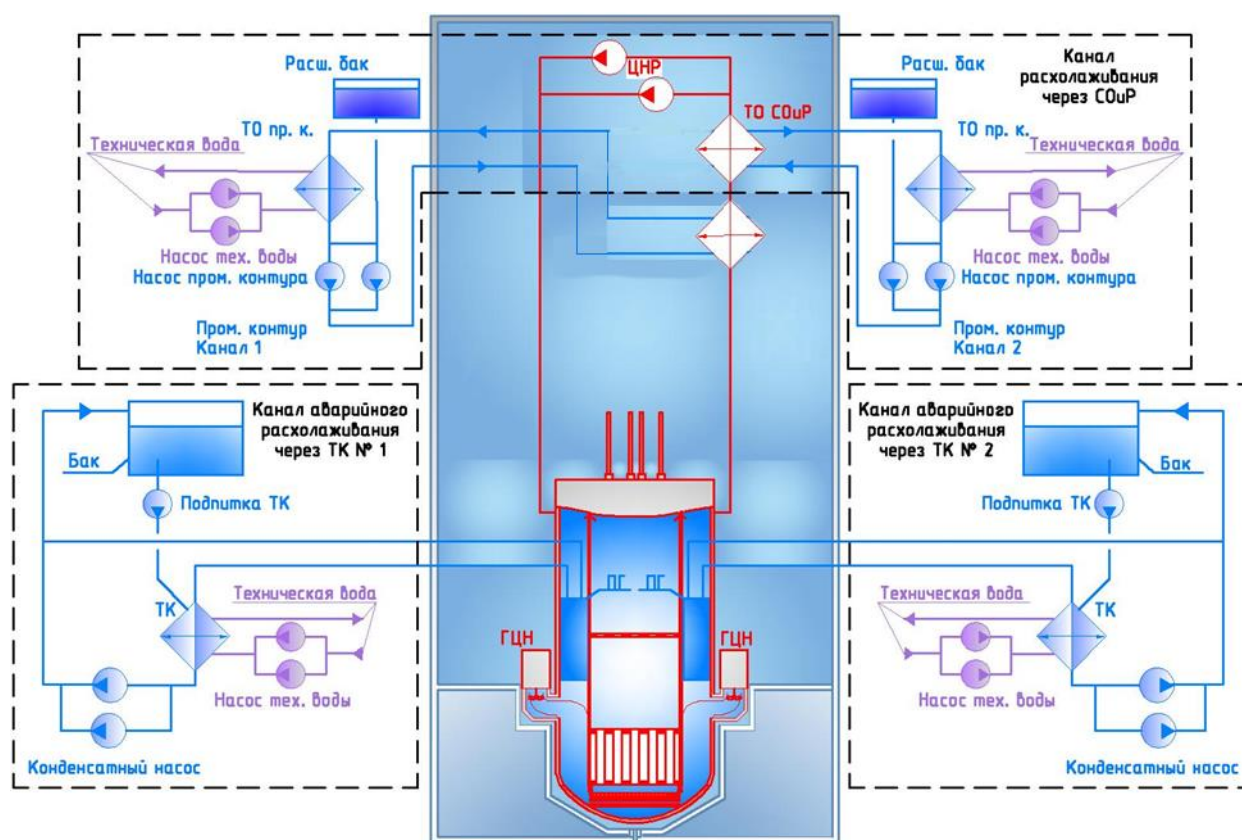


Рис. 3. Принципиальная схема активных каналов расхолаживания

Для отвода остаточных тепловыделений от реактора в случае, когда невозможно расхолаживание реактора через систему очистки и расхолаживания, систему расхолаживания через технологический конденсатор (например, при полном длительном обесточивании) предусмотрена система пассивного отвода тепла.

Теплоотвод осуществляется при помощи естественной циркуляции по первому и второму контурам атмосферному воздуху через воздушный теплообменник, а также путем нагрева и испарения воды бака СПОТ. В дальнейшем, при исчерпании запаса воды в баке, в работе остается воздушный теплообменник, обеспечивающий дальнейшее расхолаживание РУ в течение неограниченного времени.

Принципиальная схема системы пассивного отвода тепла представлена на рис. 4.

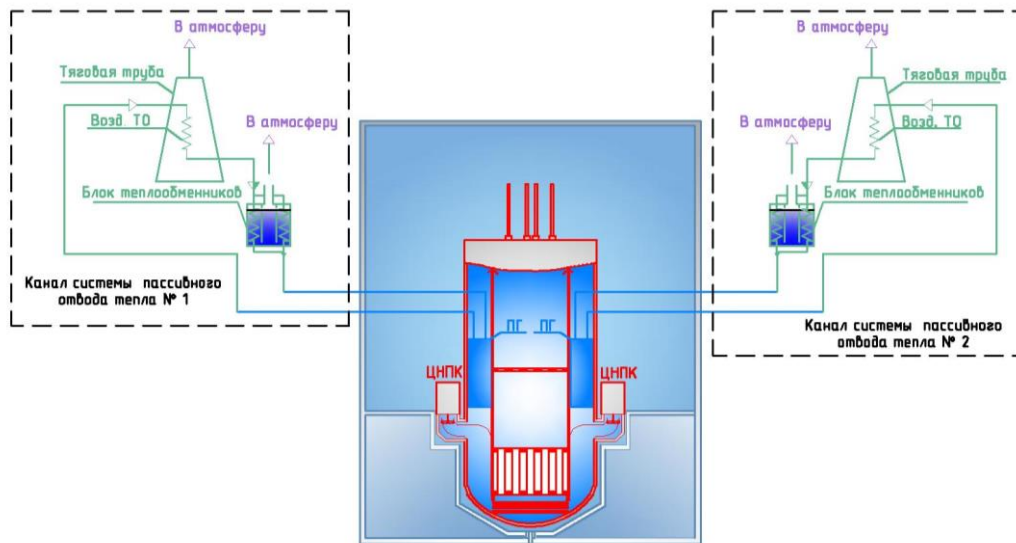


Рис. 4. Принципиальная схема системы пассивного отвода тепла

Для восполнения потерь воды из первого контура и охлаждения активной зоны в авариях с потерей теплоносителя предусмотрена система аварийной подпитки.

Система аварийной подпитки имеет два канала с подпиточными насосами. Каналы системы имеют внутреннее резервирование активных элементов (насосов, арматура).

Система аварийной подпитки вводится в действие по сигналу снижения давления первого контура до аварийной уставки.

Отвод тепла от реактора осуществляет канал системы расхолаживания через технологический конденсатор.

За счет конденсации пара на поверхности теплообменников системы отвода тепла из герметичного ограждения, подключенных к блоку теплообменников СПОТ, обеспечивается непревышение давления в герметичном ограждении величины 0,4 МПа.

Принципиальная схема активных каналов систем, обеспечивающих безопасность в авариях с потерей теплоносителя первого контура, представлена на рис. 5.

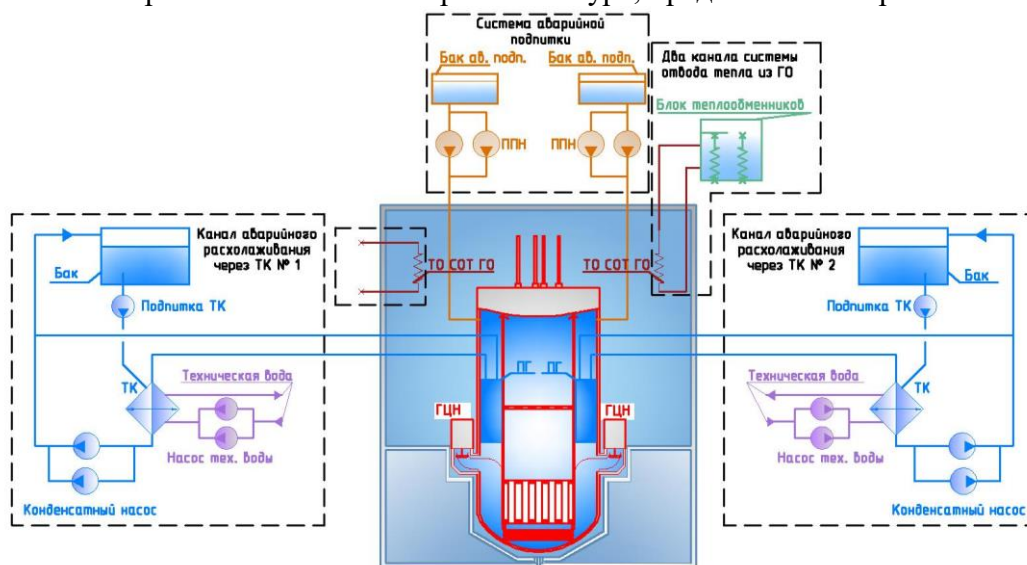


Рис. 5. Принципиальная схема активных каналов систем, обеспечивающих безопасность в авариях с потерей теплоносителя первого контура

При отказе активных систем, обеспечивающих безопасность в авариях с разгерметизацией первого контура (например, при полном длительном обесточивании) система пассивного отвода тепла совместно с герметичным ограждением, рассчитанным на внутреннее избыточное давление 0,9 МПа при запроектных авариях, обеспечивает расхолаживание реакторной установки не менее 72 ч.

Для поддержания активной зоны под уровнем теплоносителя к реактору подключаются гидроаккумуляторы системы компенсации давления.

Ограничение выброса теплоносителя первого контура в герметичное ограждение из реактора в значительной мере обеспечивается работой системы пассивного отвода тепла, эффективность теплоотвода которой обусловлена естественным поддержанием высокого давления в герметичном ограждении.

Схема пассивных систем, обеспечивающих безопасность в авариях с разгерметизацией первого контура, представлена на рис. 6.

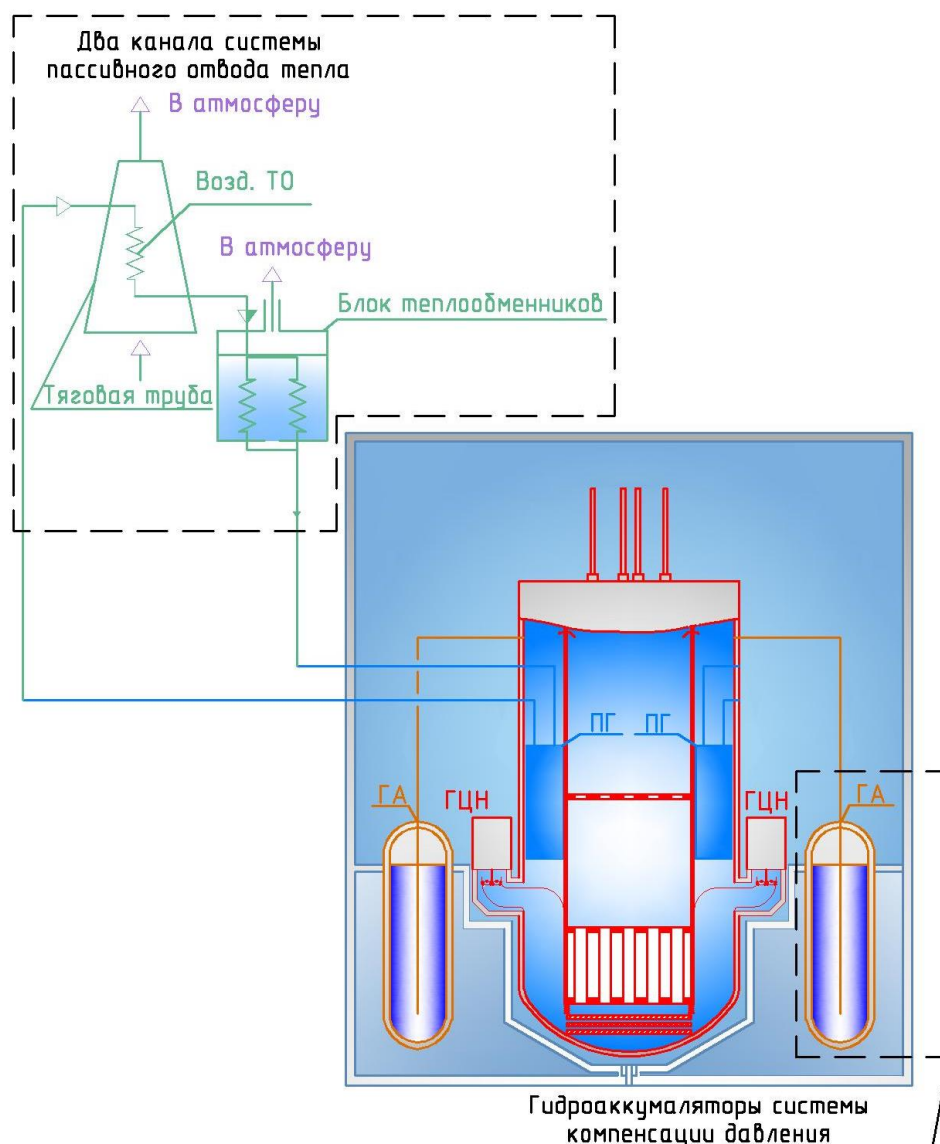


Рис. 6. Принципиальная схема пассивных систем, обеспечивающих безопасность в авариях с разгерметизацией первого контура

При анализе тяжелой запроектной аварии принято удержание расплава активной зоны в корпусе реактора. Система охлаждения корпуса реактора обеспечивает подачу воды в кессон реактора с настилов блоков биологической защиты. Пар, образующийся при отводе тепла от корпуса реактора, через зазоры между блоками биологической

защиты поступает в реакторное помещение, а затем проходит в аппаратное помещение, где конденсируется на теплообменниках системы отвода тепла из герметичного ограждения. Вода скапливается на настилах биологической защиты.

Схема систем, обеспечивающих удержание расплава активной зоны в тяжелой запроектной аварии представлена на рис. 7.

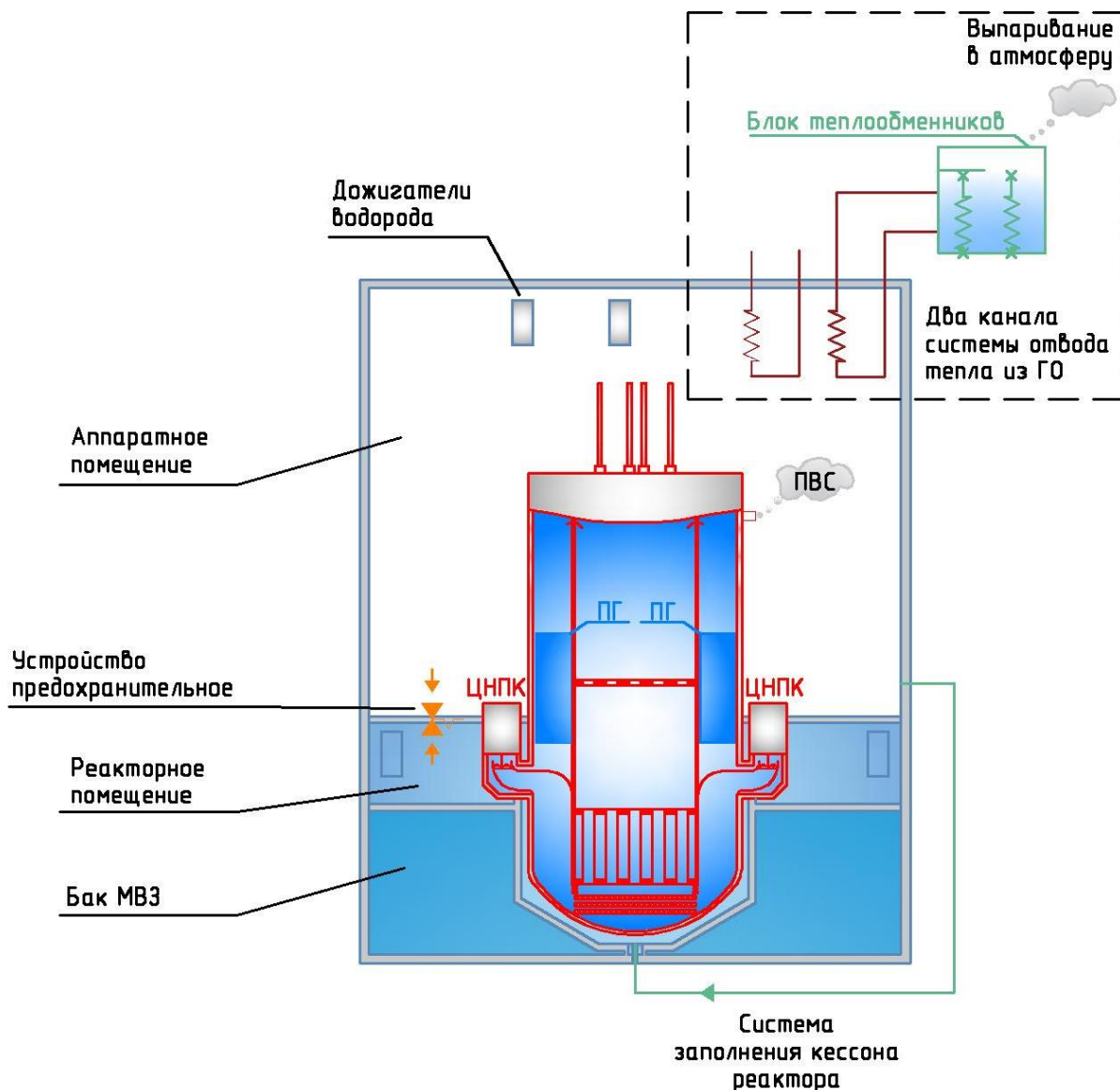


Рис. 7. Принципиальная схема системы охлаждения корпуса реактора

Основные компоновочные решения

Принципиальным компоновочным решением АСММ является размещение РУ в герметичном ограждении (ГО) в виде стальной защитной оболочки (СЗО) цилиндрической формы диаметром 8,7 м и высотой 22 м. Герметичное ограждение рассчитано на внутреннее избыточное давление 0,4 МПа при нормальной эксплуатации и 0,9 МПа при запроектных авариях.

Снаружи ГО имеет теплоизоляцию с высоким термическим сопротивлением, уменьшающую конденсацию пара на стенках СЗО. Теплоизолированное герметичное ограждение высокого внутреннего избыточного давления, теплоизоляция и поддержание

«запираания» теплоносителя при течах первого контура исключает тяжелую аварию при полном обесточивании продолжительностью не менее 72 ч.

Компоновка РУ РИТМ-200Н в СЗО приведена на рис. 8.

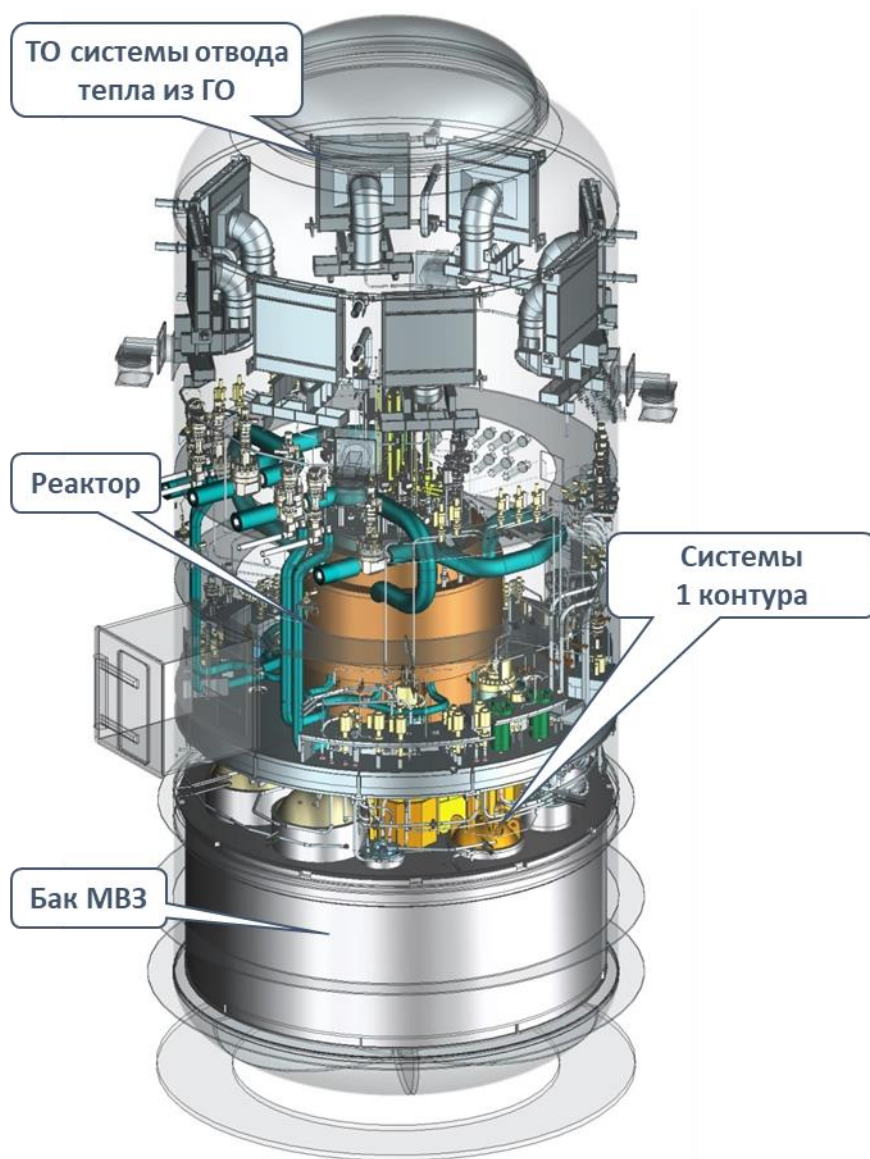


Рис. 8. Компоновка РУ РИТМ-200Н в СЗО

Для размещения и закрепления оборудования РУ в СЗО герметичного ограждения используется бак металловодной защиты. Также он предназначен для снижения уровня излучений от реактора интегрального и другого оборудования реакторной установки внутри (в аппаратном помещении) и за пределами СЗО, охлаждения установленного на нем оборудования (компенсаторов давления и гидроаккумуляторов) и снижения теплового воздействия на строительные конструкции.

Бак представляет собой сварную конструкцию, состоящую из корпуса, кессона реактора и кессона теплообменника. На крышке корпуса бака расположены кольцо опорное – опора для реактора, патрубки подвода и отвода воды промежуточного контура, патрубков дренажа и обечайки, предназначенные для крепления оборудования.

Конструкция бака приведена на рис. 9.

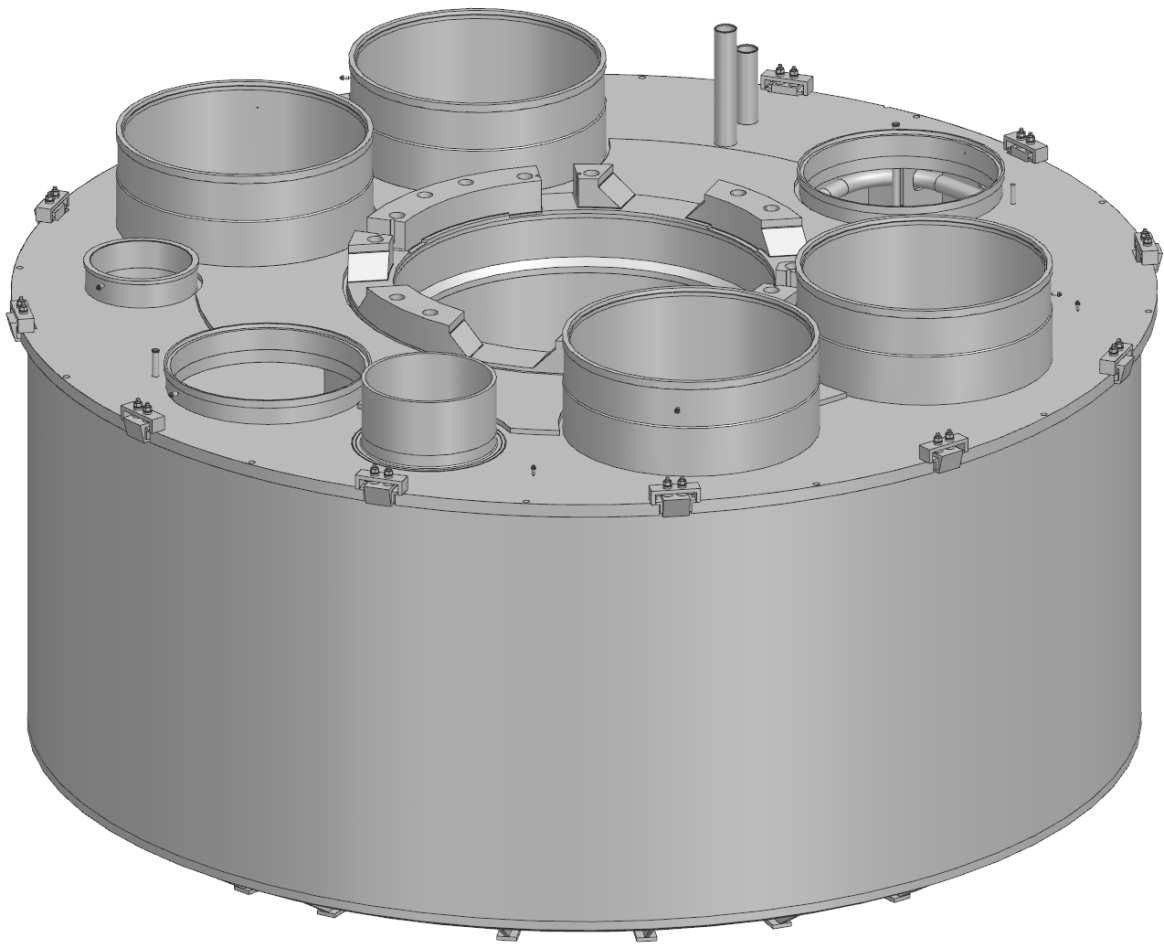


Рис. 9. Бак МВЗ

Заключение

Сочетание апробированных технических решений судовых реакторных установок с опытом создания современных проектов реакторных установок с высоким уровнем безопасности позволяет реализовать в реакторной установке РИТМ-200Н все принципиальные требования безопасности, надежности и экономичности, предъявляемые к перспективным атомным станциям нового поколения.

Использование отработанных технических решений и технологий изготовления, транспортировки, монтажа и сооружения обеспечивает возможность разработки проекта, сооружения и пуска атомной станции в сжатые сроки.

АСММ с РУ РИТМ-200Н отвечает всем требованиям для энергообеспечения удаленных населенных пунктов и промышленных производств в локальной энергосистеме малой мощности.

Список литературы

1. АО "ОКБМ Африкантов" – научно-производственный центр атомного машиностроения. 75 лет в атомной отрасли. /Зверев Д.Л., Петрунин В.В., Бабушкин С.В., Беляев В.М., Васильев Б.А., Васяев А.В., Душев С.А., Кодочигов Н.Г., Маров И.В., Неевин С.М., Романов А.И., Самойлов О.Б., Фадеев Ю.П., Шепелев С.Ф., Шмелев И.В. //Атомная энергия. 2020 г. Т. 129. № 1. С. 3–13.

2. Опыт создания и перспективы развития ядерных энергетических установок для ледокольного флота и энергообеспечения арктического региона. /Зверев Д.Л., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н., Полуничев В.И. //Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 6. С. 318–322.
3. Доклад «Научно-технические и экономические аспекты создания инновационных реакторных установок для атомных станций малой и средней мощности наземного и плавучего исполнения» авторов Петрунина В.В., Кураченкова А.В., Фатеева С.А., Шешинной Н.В. для представления на Доллежалевских чтениях в АО «НИКИЭТ», г. Москве, 12 марта 2020 г.
4. Доклад «Обликовый проект АСММ с РУ РИТМ-200» авторов Петрунина В.В., Фадеева Ю.П., Пахомова А.Н., Вешнякова К.Б., Полуничева В.И., Шаманина И.Е. для представления на V Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2018), 2–5 октября 2018 г., г. Москве и на научно-практической конференции «Ядерные технологии: от исследований к внедрению», 21 ноября 2018 г., г. Нижний Новгород.
5. Доклад «Инновационные реакторные установки разработки АО «ОКБМ Африкантов» для атомных станций малой мощности» автора Петрунина В.В., для представления на XIII Международном общественном форум-диалоге «АтомЭко–2019», прошедшем 5–7 ноября 2019 г., в Венгрии, г. Печ.