

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.534

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.Р. Маров, А.В. Львов, Н.С. Волков

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ РЕАКТОРНОГО КОНТУРА УСТАНОВОК БРС-ГПГ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ И ПЛАВУЧИХ АЭС

Нижегородский государственный технический университете им. Р.Е. Алексеева

Представлен анализ научно-технической информации по опыту создания и эксплуатации реакторной установки (РУ) со свинец-висмутовым теплоносителем и опыту проектирования РУ БРЕСТ и СВБР со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем соответственно. Приведены результаты научно-теоретических и экспериментальных исследований в рамках разрабатываемых в НГТУ РУ малой и средней мощности «Быстрый реактор свинцовый с горизонтальными парогенераторами» (БРС-ГПГ). Представлены описания основных узлов и агрегатов установки, обоснован выбор вида теплоносителя. Предлагаемая структурная схема реакторного контура позволяет достигать максимального эффекта естественной циркуляции Pb или PbBi, что гарантирует обеспечение надежности, безопасности и расширения эксплуатационных возможностей РУ. Анализ результатов работ по моделированию одной из наиболее потенциально опасных аварий в РУ с ТЖМТ – «большая течь парогенератора» дает понимание о необходимости изменения традиционной компоновки парогенерирующих поверхностей (РУ АПЛ, БРЕСТ, СВБР). Такая компоновка позволяет исключить попадание воды в АЗ реактора, переопрессовку первого контура, срыв крышки бака реакторной установки и др. Рассмотрены варианты систем технологии свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей применительно к реакторным установкам с ТЖМТ. Обоснована целесообразность применения характеристик активной зоны применительно к РУ БРС-ГПГ, аналогичным принятым для РУ СВБР или БРЕСТ-ОД-300. Предложена система расхолаживания реактора и обеспечения стояночных режимов РУ, исследуются ее характеристики, отрабатываемые на стендах НГТУ.

Ключевые слова: быстрый реактор, ТЖМТ, БРС-ГПГ, аварийная ситуация «Течь ПГ», естественная циркуляция, естественная безопасность, технология теплоносителя, плавучая атомная станция.

Введение

В настоящее время растет интерес к атомным станциям с реакторами малой и средней мощности применительно к труднодоступным и малоосвоенным регионам. Этот факт инициирует теоретические и экспериментальные работы по разработке эволюционных, передовых проектных и эксплуатационных решений энергетических установок с реакторами четвертого поколения на быстрых нейтронах, охлаждаемых расплавами Pb и PbBi. Данные решения основываются на уникальном отечественном опыте создания и эксплуатации наземных стендов-прототипов (27ВТ, 27ВТ-5, КМ1), опытных (АПЛ пр. 645) и серийных (АПЛ пр.705 и 705К) РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем, а также опыте работ, направленных на создание энергоблоков атомных станций различного назначения со свинцовым (БРЕСТ) [1] и свинцово-висмутовым (СВБР) [2] теплоносителями. Эти эволюционные решения дают возможность реализовать принципы «естественной безопасности» [1] к перспективным РУ с ТЖМТ. Определение принципа естественной безопасности было приведено в «Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI в.», одобренной Правительством РФ 25 мая 2000 г. Преимущества реакторных установок четвертого поколения по сравнению с другими продемонстрированы в научных работах сотрудников ведущих предприятий и институтов атомной отрасли, в том числе – НГТУ [1-6].

В НГТУ продолжают исследования в подтверждение разработанных технических решений и начальный этап проработки установки с реактором на быстрых нейтронах с горизонтальными парогенераторами (БРС-ГПГ), охлаждаемыми свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем в мощном диапазоне от 50 до 250 МВт (эл.), в том числе – и для плавучих атомных станций.

В настоящей работе представлены результаты анализа и комплекса исследований, направленных на обоснование новых, нетрадиционных технических решений РУ БРС-ГПГ (схемы циркуляции в реакторном контуре, тип парогенераторов, отвод тепловыделений от реакторного контура в стояночных и аварийных режимах и др.)

Выбор теплоносителя для БРС-ГПГ

Применение свинца в качестве теплоносителя энергетического реактора малой и средней мощности (такого, как БРС-ГПГ) является более обоснованным, чем эвтектики свинец-висмут, исходя из критериев безопасности и экономичности. Эвтектика, по сравнению со свинцом, имеет высокий уровень активности при работе РУ по ^{210}Po , где полония в 20 000 раз больше [5]. Наличие полония при нормальной эксплуатации и герметичном контуре никакой опасности не несет, однако при перегрузках АЗ, плановых ремонтных работах и аварийных ситуациях с разгерметизацией контура возникают угрозы радиоактивного загрязнения окружающей среды и здоровью персонала [7]. Работа энергетического реактора со свинцом в этом смысле более безопасна, хотя для исследовательских РУ и ускорительно-управляемых систем данный фактор несущественен ввиду того, что в них образуется и множество других существенно более биологически опасных материалов.

Свинцово-висмутовый теплоноситель также имеет меньший потенциал окислительно-восстановительных реакций по сравнению со свинцовым теплоносителем. Особенно остро эта проблема стоит при снижении эксплуатационных температурных интервалов до 250-300 °С, что актуально для ускорительно-управляемых систем. В силу этого в РУ со свинцом-висмутом тяжелее поддерживать оптимальную термодинамическую активность кислорода в теплоносителе, что может вызывать аварийное раскисление или забивание оксидами контура [5, 7], что недопустимо с точки зрения безопасной эксплуатации. Помимо этого, висмут имеет в десятки раз большую стоимость, чем у свинца.

При всех недостатках эвтектический сплав свинец-висмут более совместим с водой в качестве рабочего тела в цикле Ренкина. Температура плавления эвтектики свинец-висмут – 123 °С. При данной температуре давление насыщенного пара составляет 0,23 МПа. Это позволяет надежно отводить тепло водой при давлении более 0,3 МПа без замораживания эвтектики от всего оборудования РУ с данным теплоносителем. В свою очередь, это дает возможность расхоложивать реакторную установку и при необходимости обогревать элементы контура водой и паром в стояночных и переходных режимах с исключением застывания эвтектического теплоносителя. В реакторной установке со свинцовым теплоносителем при отводе тепла в переходных, стояночных и ремонтных режимах необходимо поддерживать давление воды, которым отводится это тепло, выше 12,3 МПа, так как при данном давлении вода находится на линии насыщения при температуре 326 °С – температура плавления свинца [6]. Снижение давления приводит к «замерзанию» теплоносителя. Поддерживать такое высокое давления по воде в полостях парогенератора или в иных теплообменниках в переходных, стояночных и ремонтных режимах очень сложно и практически невозможно. Для преодоления данной трудности коллектив НГТУ предлагает некоторые технические решения, о которых будет сказано далее. Богатый опыт работы на статических и циркуляционных стендовых установках с расплавами свинца и эвтектики свинец-висмут показывает, что нет принципиальной разницы в их эксплуатации при поддержании определенных уровней температур контуров электрическим обогревом.

По прочим характеристикам свинцовый и свинцово-висмутовый теплоносители реакторных установок практически одинаковы.

Особенности циркуляционной схемы теплоносителя реакторного контура

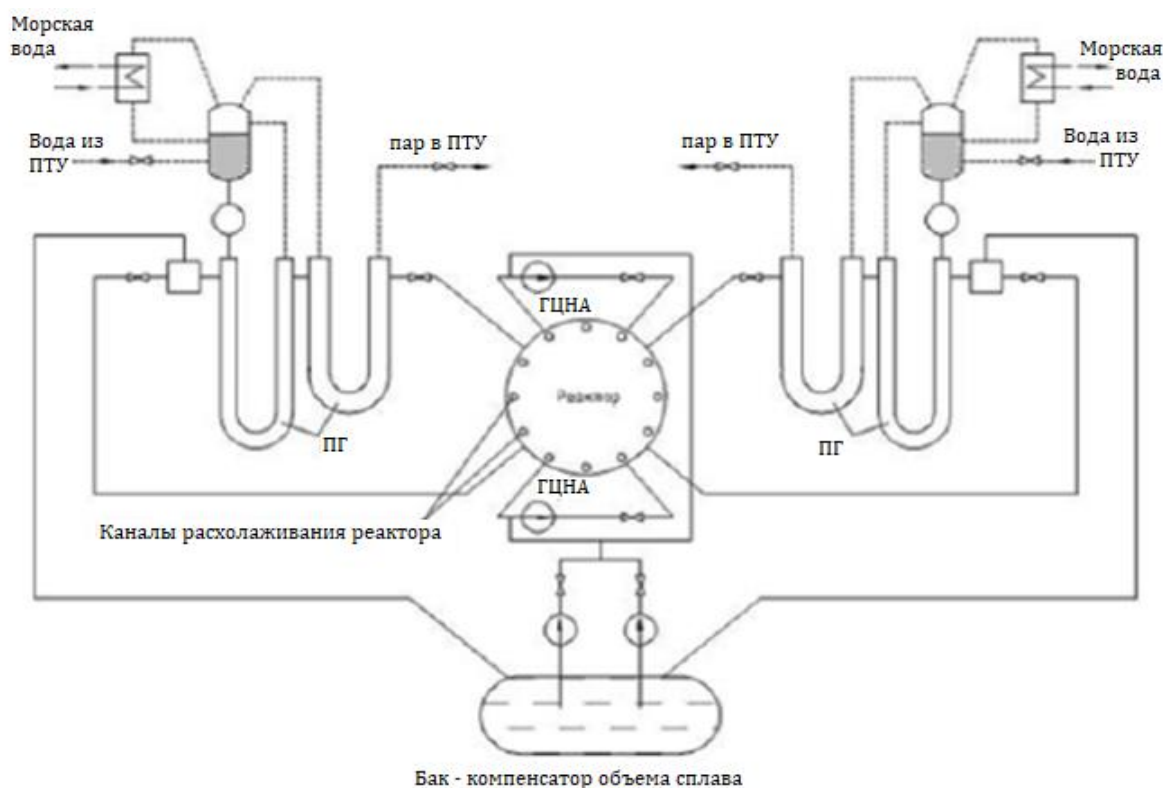


Рис. 1. Принципиальная схема РУ проекта 705К

Реакторные установки станков-прототипов и АПЛ со свинцово-висмутовым теплоносителем были выполнены в петлевой компоновке (рис. 1), что создавало высокие гидравлические сопротивления по всему контуру, проблемы с забиванием относительно малых проходных сечений многочисленных трубопроводов, парогенераторов (ПГ), активной зоны (АЗ) и пр. контура шлаками и «замершим» теплоносителем. В связи с этим возникли задачи проектирования главных циркуляционных насосов (ГЦН) с большим напором и малым расходом, прежде всего – центробежных, введения бака-компенсатора объема, что еще больше увеличивало сопротивление. Появилась необходимость разработки методов поддержания технологии теплоносителя, обогрева контура в стояночных и переходных режимах. Также маловероятна или невозможна естественная циркуляция теплоносителя.

Существующие проекты БРЕСТ и СВБР со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями соответственно имеют баковую (интегральную) компоновку контура (рис. 2, 3), что позволяет значительно уменьшить общее гидравлическое сопротивление трассы циркуляции, а также многократно повысить возможность естественной циркуляции теплоносителя. Имеется возможность использовать осевые или диагональные ГЦН с низким напором и большим расходом. Такие насосы имеют намного меньшие массогабаритные характеристики по сравнению с центробежными насосами при одинаковом расходе. Упрощается задача обогрева одного большого корпуса РУ по сравнению с многочисленными трубопроводами петлевой РУ. Снижается вероятность забивания шлаками больших проходных сечений интегрального контура, относительно малых проходных сечений петлевого контура. Нет необходимости введения отдельного бака-компенсатора объема, так как в баке реакторной установки имеется свободный уровень теплоносителя, из-за чего бак сам по себе является компенсатором.

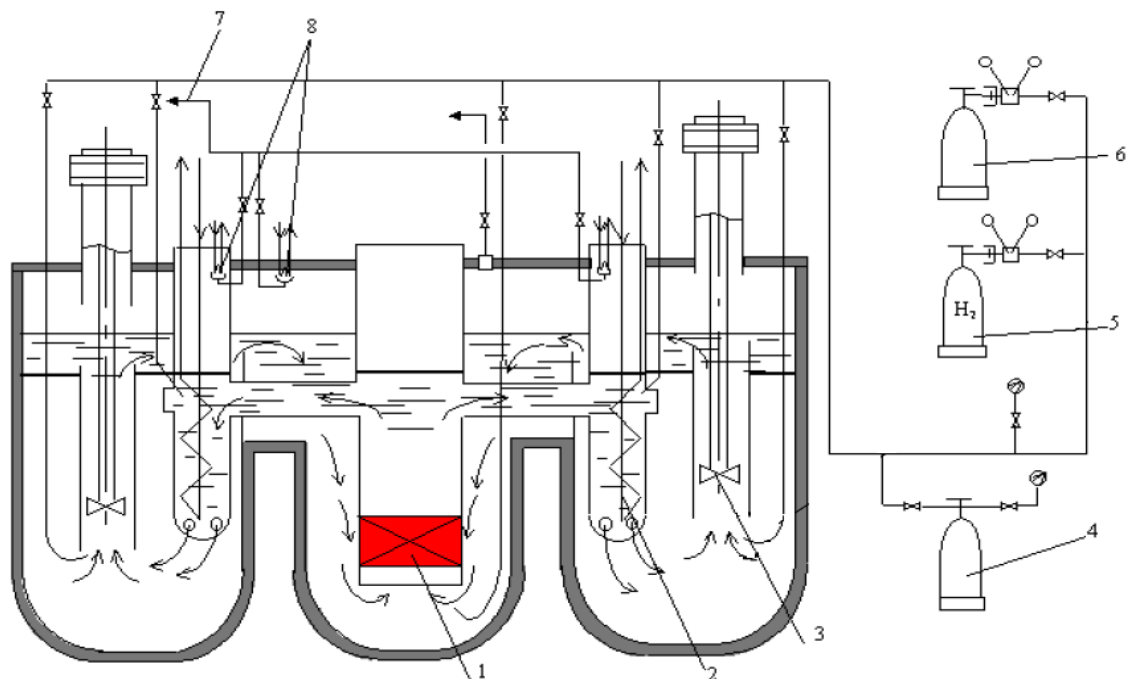


Рис. 2. Принципиальная схема реакторного контура РУ БРЕСТ-ОД-300 [1]

- 1 – активная зона; 2 – парогенератор; 3 – главный циркуляционный насос;
 4 – баллон с газовой смесью; 5 – баллон с водородом; 6 – баллон с аргоном;
 7 – линия отвода конденсата в цистерну «грязных вод»; 8 – конденсаторы водяного пара

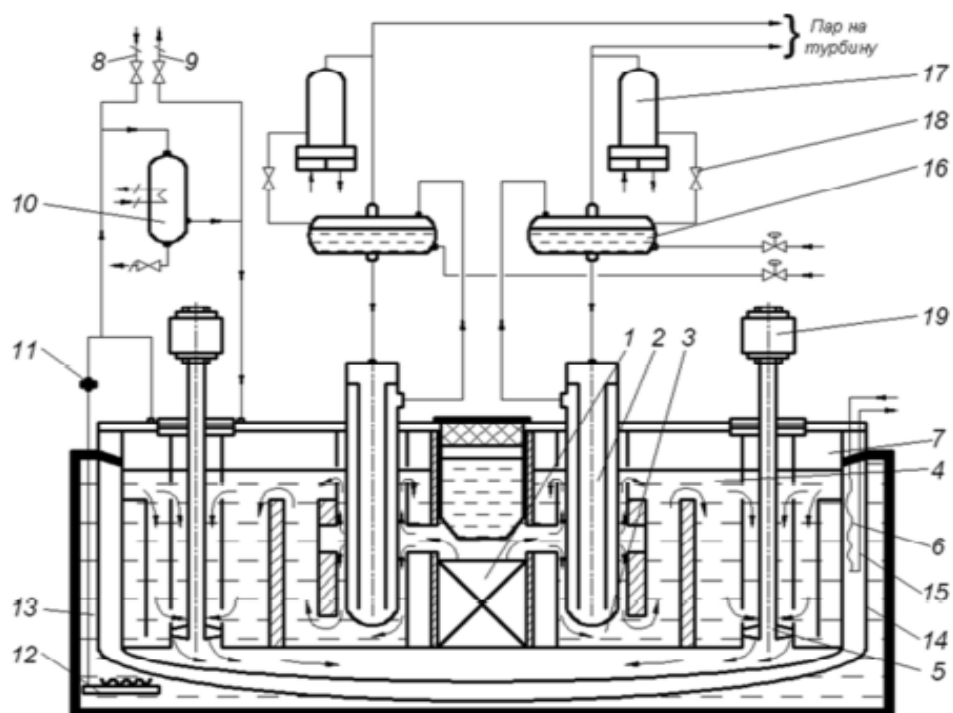


Рис. 3. Принципиальная схема реакторного контура РУ СВБР-100 [4]

- 1 – АЗ; 2 – ПГ; 3 – нижний коллектор ПГ; 4 – верхний коллектор ПГ;
 5 – главный циркуляционный насос; 6 – свободный уровень теплоносителя;
 7 – газовый объем блока; 8 – трубопровод подвода газа; 9 – трубопровод сброса газа;
 10 – аварийный конденсатор; 11 – разрывная мембрана; 12 – барботажное устройство;
 13 – водяной объем бака системы пассивного отвода тепла; 14 – страховочный кожух;
 15 – оборудование парового обогрева; 16 – сепаратор; 17 – конденсатор расхолаживания;
 18 – запорно-регулирующий клапан; 19 – электродвигатель насоса

Компоновка предлагаемой РУ имеет предпосылки улучшения гидравлических характеристик контура по сравнению с контурами современных РУ с ТЖМТ, что позволяет снизить гидравлическое сопротивление контура циркуляции.

Если сравнивать БРЕСТ, СВБР и БРС-ГПП, очевидно преимущество последнего за счет того, что контур циркуляции на каждой петле теплообмена имеет только по одному подъемному и опускному участку движения теплоносителя [8]. Такое техническое решение позволяет качественно снизить общее гидравлическое сопротивление трассы. Тогда как в РУ БРЕСТ и СВБР имеется по два таких участка контура циркуляции, что увеличивает его гидравлическое сопротивление. Количественная оценка данного выигрыша будет проведена в будущем. Циркуляция теплоносителя осуществляется следующим образом. Проходя активную зону, теплоноситель аккумулирует теплоту, заключенную в топливе, далее расплав свинца направляется в парогенератор, который разделен на две секции – пароперегревательную и испарительную, где имеется свободный уровень Рв, где отдает тепло. Далее он идет через ГЦН обратно в активную зону, и контур замыкается (рис. 4-б).

Предложенный авторами вариант конструкции первого контура позволяет развивать эффективную естественную циркуляцию, что повышает безопасность РУ, поскольку обеспечивает гарантированный теплосъем остаточных энерговыделений активной зоны. Также можно говорить и о повышении экономичности установки в целом за счет увеличения ее удельной мощности, так и за счет снижения массогабаритных свойств РУ БРС-ГПП.

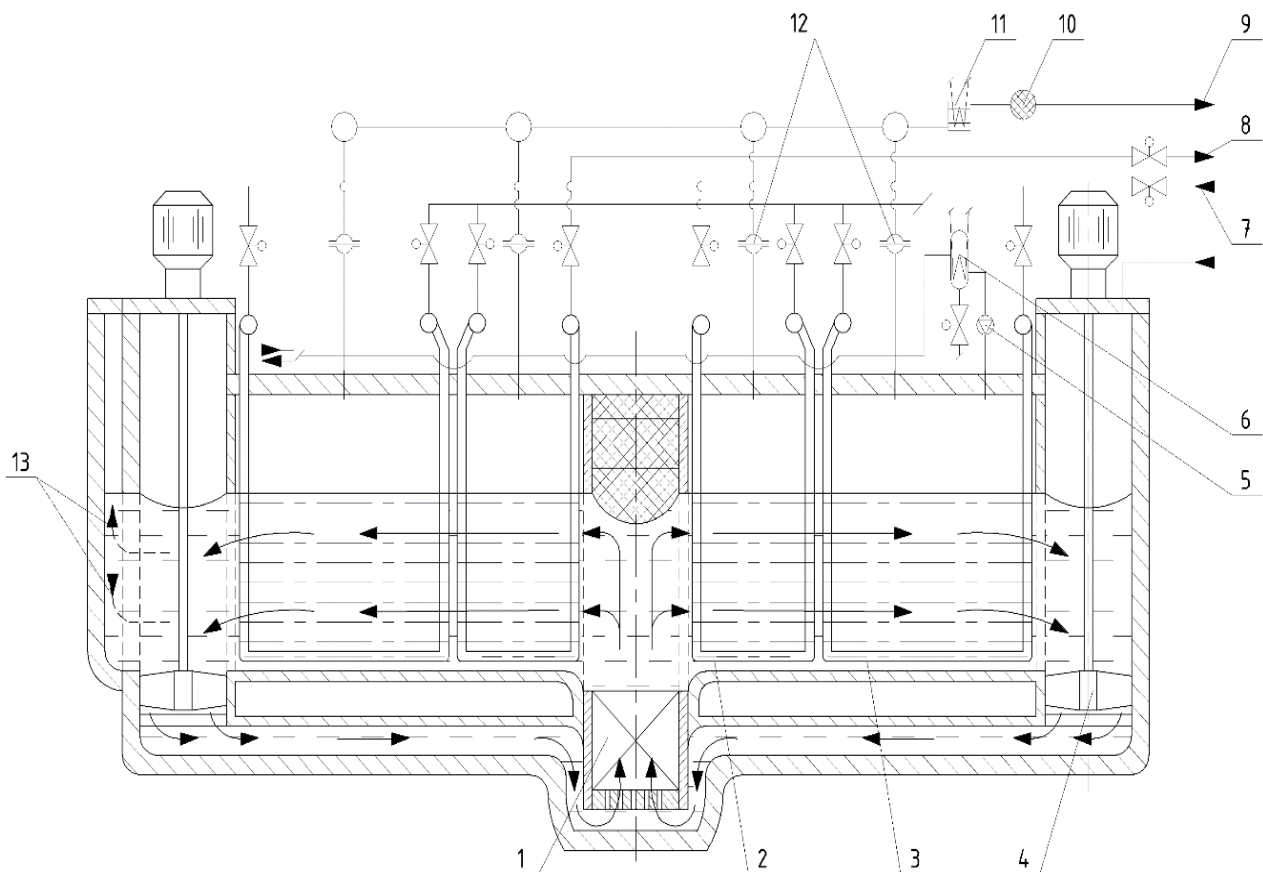


Рис. 4. Конструктивная схема БРС-ГПП [6]

- 1 – АЗ; 2 – пароперегреватель; 3 – испаритель; 4 – главный циркуляционный насос;
 5 – газодувка; 6 – аварийный конденсатор; 7 – подвод питательной воды;
 8 – пар на турбину; 9 – сброс газа в атмосферу; 10 – фильтр; 11 – конденсатор;
 12 – мембрана разрывная; 13 – к системе стоячного и аварийного теплоотвода

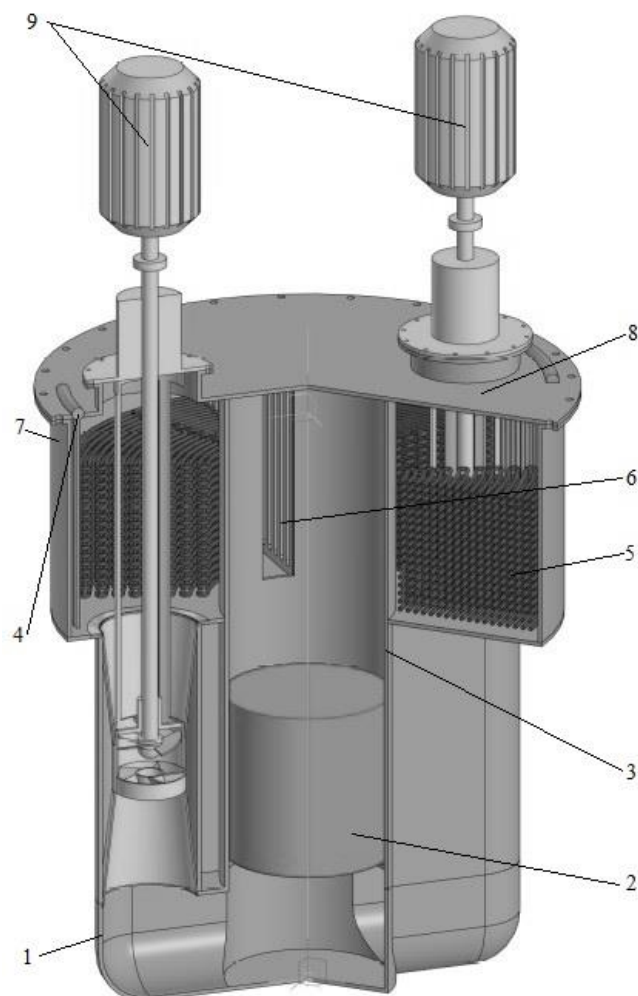


Рис. 5. Модель реакторного контура БРС-ГПГ

1 – корпус реактора; 2 – активная зона; 3 – шахта активной зоны;
4 – система стояночного и аварийного отвода тепла; 5 – секция ПГ;
6 – раздаточный коллектор; 7 – обечайка ПГ; 8 – крышка РУ; 9 – ГЦН

Обеспечение безопасности ядерной энергетической установки при аварийной ситуации «Большая неплотность ПГ»

В 2007-2013 гг. в НГТУ проводился ряд научно-технических работ по определению характеристик «легкой» фазы (вода, пар, аргон, водород и др.) при вводе ее с различными расходами под свободный уровень расплавов свинца и эвтектического сплава свинец-висмут. При этом сопло истечения заглублялось на большие глубины в условиях эксперимента (до четырех метров). Перепад давления в сопле достигался значений восемь Мпа, температура теплоносителя при проведении испытаний – 600 °С.

Экспериментами было зафиксировано, что «лёгкая» фаза создаёт прямой канал истечения от сопла истечения до свободного уровня теплоносителя (кризис барботажа второго рода), вне зависимости от параметров исходной циркуляции ТЖМТ [4, 9]. При этом скорость фронта раздела ТЖМТ и «легкой фазы» на удалении от места истечения достигала 30 м/с. Во время экспериментов возникали большие динамические нагрузки на конструктивные элементы стенда, которые в некоторых случаях приводили к их разрушению.

Анализируя результаты проведенных работ одной из наиболее потенциально опасных аварий в реакторных установках с ТЖМТ – «большая течь парогенератора», можно сделать вывод, что данная авария может привести к разрушениям при высоте столба ТЖМТ 1,5 м и выше, по ходу которого пароводяная смесь может «разогнаться» до опасных скоростей. Такая ситуация может возникнуть в РУ БРЕСТ и СВБР, где парогенерирующие блоки расположены вертикально. Что бы избежать «разгона» смеси «ТЖМТ – пароводяная смесь» в РУ БРС-ГПГ предлагается конструкция горизонтального парогенератора, в котором змеевики находятся под минимальным уровнем теплоносителя (мин. 1,0 м), а объем газовой полости над свободным уровнем превышает или равен объему жидкого металла [10]. Такое решение в случае аварийного разрушения («большой течи») трубной системы ПГ даже при наибольшем расходе аварийного потока пара обеспечивает минимальные последствия при самоорганизации парового канала от места разрыва трубной системы до газового (парогазового) объема, находящегося над свободным уровнем свинца. Далее пар из аварийного парогенератора через разрывную мембрану направляется в конденсатор. Образованный конденсат удаляется через систему «грязных вод», а газ удаляется через систему газоочистки в атмосферу [5, 9].

Эти и многие другие технические решения вопросов безопасности придают БРС-ГПГ новые более высокие уровни безопасности, которые другие РУ не имеют.

Конструктивные особенности парогенератора

Отличительной чертой компоновок U-образного типа парогенераторов транспортных РУ было продольное обтекание труб этого теплообменника. Парогенератор проекта СВБР имеет трубки Фильда [2]; а ПГ РУ БРЕСТ – змеевиковые с малым угломгиба змеевика. Такие ПГ имеют вертикальную компоновку с достаточно большим заглублением труб (рис. 2, 3). При такой компоновке авария «большая течь ПГ» становится наиболее опасной, так как столб пароводяной смеси на большом заглублении может иметь достаточный запас энергии для срыва крышки бака реакторного блока. «В парогенераторах реакторных установок БРС-ГПГ конструкция трубной системы парогенератора имеет максимальное заглубление под свободный уровень ТЖМТ, например, в виде системы плоских змеевиков. Концы труб секций парогенератора заделываются в трубные доски водяных и паровых камер верхней плиты реакторного блока. В НГТУ выполнены работы по экспериментальному определению характеристик теплообмена горизонтальной трубной системы, при обтекании ее высокотемпературным свинцовым теплоносителем» [6].

Авторами предложены компоновочные и технические решения парогенераторов для плавучих атомных станций, судов и кораблей с РУ БРС-ГПГ [11]. В НГТУ предлагается компоновка парогенераторов, при которой теплообменная поверхность «затоплена» теплоносителем полностью и ограничена сверху крышкой, т. е. над ПГ нет свободной поверхности теплоносителя. Над активной зоной выше коллектора, из которого теплоноситель поступает в парогенераторы, расположена свободная поверхность, через которую проходят элементы конструкций СУЗ реактора. В кессонах насосов так же имеется свободный уровень, расположенный выше крышки парогенератора, из которого теплоноситель поступает в насосы. Оси двух насосов располагаются в диаметральных плоскостях ядерной энергетической установки и плавучих атомных станций, судов и кораблей.

В совокупности предложенные решения позволяют уменьшить площадь свободной поверхности по сравнению с наземными РУ БРС-ГПГ, исключить возможность осушения парогенератора и активной зоны и ограничить осушение элементов насосов до приемлемых пределов при качках и ограниченных дифферентах. Это, в свою очередь, позволит сделать ядерную энергетическую установку плавучих атомных станций, судов и кораблей более безопасной.

Для обеспечения безопасности при аварии «большая течь ПГ» крышку над полностью затопленными секциями ПГ выполняются в виде мембраны, над которой имеется газовая полость, сообщенная через разрывную мембрану с конденсатором, газовый объем которого сообщен с атмосферой через систему газоочистки. При этом отсутствует вероятность силового воздействия на крышку реакторного блока. При аварии «малая течь ПГ» мембрана не разрывается, а малый объем пароводяной смеси скапливается под мембраной и с потоком ТЖМТ уносится на свободную поверхность теплоносителя над кессоном насоса, газовая полость которой сообщена аварийными конденсаторами пара и газодувкой.

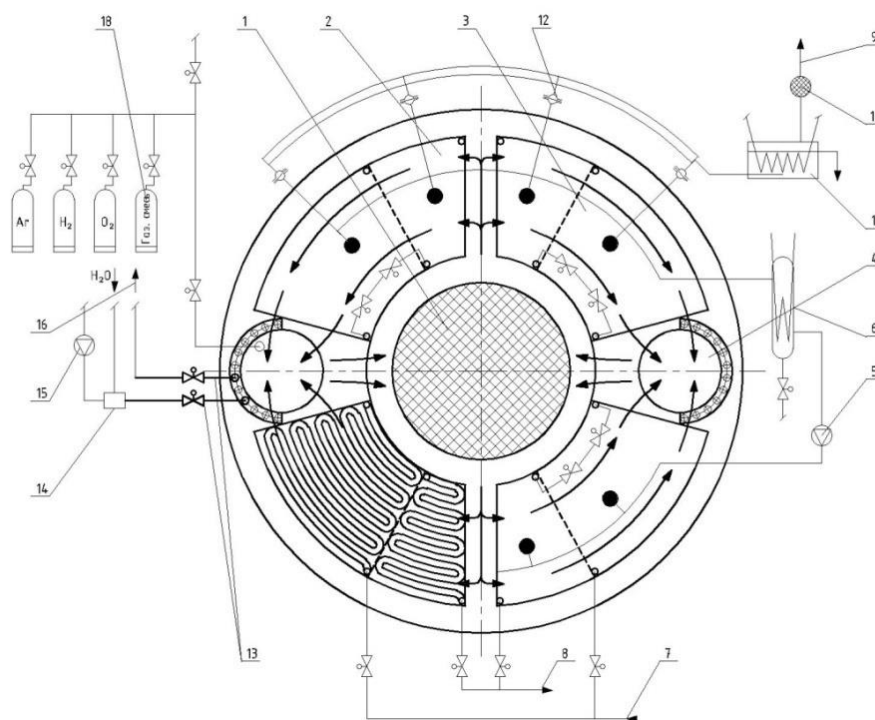


Рис. 6. Принципиальная схема реакторного контура БРС-ГПГ вид сверху

- 1 – активная зона; 2 – пароперегреватель; 3 – испаритель;
 4 – главный циркуляционный насос; 5 – газодувка; 6 – аварийный конденсатор;
 7 – подвод питательной воды; 8 – пар на турбину; 9 – сброс в атмосферу; 10 – фильтр;
 11 – конденсатор; 12 – мембрана разрывная; 13 – к системе стоячного и аварийного теплоотвода; 14 – смеситель; 15 – компрессор; 16 – отвод воздушно-паровой смеси

Система поддержания качества теплоносителя

Данная система необходима для соблюдения технологии теплоносителя, и заключается в сохранении и поддержании необходимой термодинамической активности кислорода в теплоносителе. Существуют различные методики поддержания нужного количества кислорода в контуре. В прорабатываемой в НГТУ реакторной установке БРС-ГПГ предлагается ввод газа в циркуляционный поток теплоносителя реакторного контура в специальном устройстве формирования струй, брызг, капель потока ТЖМТ, при падении на свободную поверхность теплоносителя формирующие пузырьки газа с дальнейшим захватом их в объем жидкого металла. Это устройство размещается во входных камерах главных циркуляционных насосов [12].

Устройство, представленное на рис. 7, позволит выполнять как восстановление оксидов теплоносителя, так и добавления кислорода в контур для поддержания необходимой толщины защитных оксидных покрытий. Применение устройства не требует ввода в конструкцию РУ дополнительных байпасных контуров. Подробное описание устройства представлено в [16].

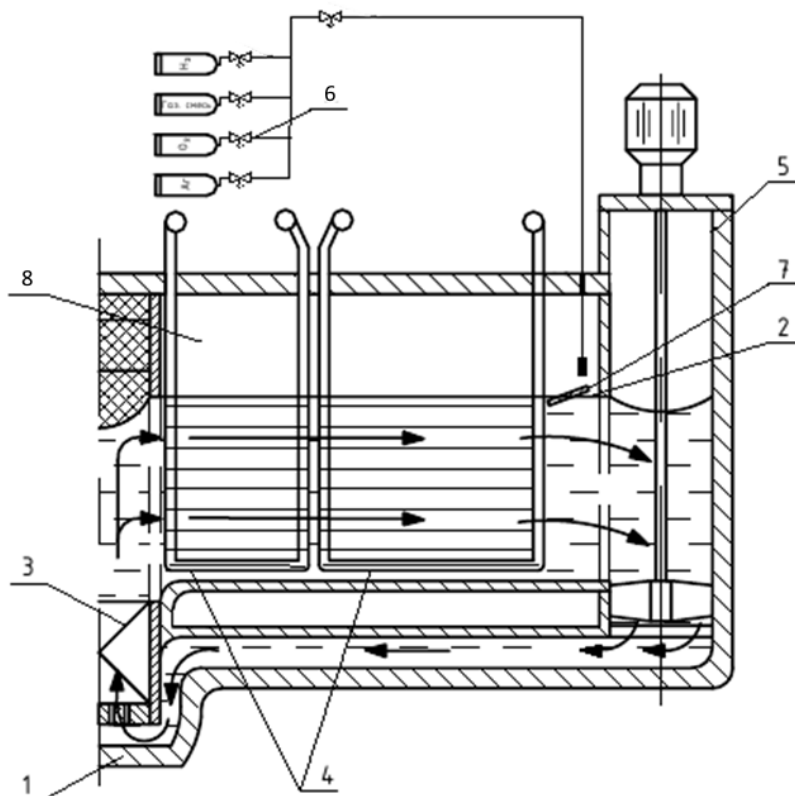


Рис. 7. Схема размещения устройства формирования участков струй, брызг и капель потока ТЖМТ в ядерной энергетической установке

1 – корпус реактора; 2 – свободный уровень ТЖМТ; 3 – активная зона;
4 – секции парогенератора; 5 – ГЦН; 6 – система подвода окислительных
и восстановительных газовых смесей; 7 – пластина – возбудитель потока;
8 – газовый объем реактора

Также предлагается использование конструкции газового массообменника, успешно отработанной в НГТУ на высокотемпературных циркуляционных стендах (рис. 8) [12]. В отличие от выше описанной установки, для работы газового массообменника необходим ввод в контур байпасных трубопроводов, но его конструкция позволяет более эффективно вводить газовую фазу в поток теплоносителя и более точно регулировать количество газа, вводимое в контур. Конструкция отличается своей простотой в исполнении и отсутствием движущихся частей. Использование в РУ устройств регулирования содержания кислорода различных видов позволит точно и своевременно обеспечивать требуемую технологию ТЖМТ. Подробное описание работы массообменника, а также экспериментально подтвержденные показатели эффективности его работы представлены в [17].

Активная зона реактора БРС-ГПГ

Для активной зоны РУ БРС-ГПГ, как и для других РУ с ТЖМТ, характерно то, что и свинцовый, и свинцово-висмутный теплоносители имеют малые замедление и поглощение нейтронов, что позволяет без заметного ухудшения баланса нейтронов увеличить шаг твэлов и проходное сечение активной зоны, уменьшить максимальную скорость и, соответственно, напор ГЦН и обеспечить высокий уровень естественной циркуляции. В данном случае при использовании большого шага решетки твэлов может применяться бесчехловая ТВС.

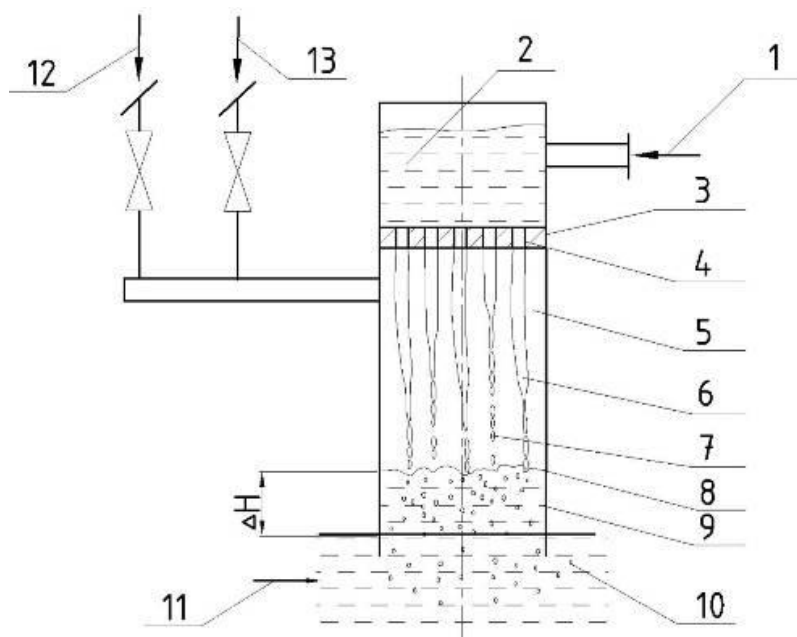


Рис. 8. Конструктивная схема газового массообменника

1 – подача ТЖМТ; 2 – напорная камера; 3 – перфорированная решетка;
 4 – отверстие истечения; 5 – газовый объем; 6 – струя ТЖМТ; 7 – капли ТЖМТ;
 8 – возможные положения свободного уровня ТЖМТ; 9 – корпус; 10 – газ, эжектируемый падающими каплями теплоносителя; 11 – поток ТЖМТ в контуре; 12 – газ из газового объема реакторного блока; 13 – окислительные и восстановительные газовые смеси из системы газа

Использование высокоплотного и теплопроводного моноснитридного топлива в реакторе на быстрых нейтронах без уранового blankets позволяет [1]:

- исключить быстрый разгон за счет снижения пустотного и мощностного эффектов реактивности и других эффектов;
- уменьшить среднюю рабочую температуру топлива, уменьшить выход осколков газовой составляющей, снизить давление на оболочку ТВЭЛов, повысить надежность ТВС в номинальных и аварийных режимах;
- обеспечить полное воспроизводство топлива в активной зоне и компенсировать изменение при выгорании.

Замедление и спад потока нейтронов в отражателе ТЖМТ уменьшает радиационные повреждения элементов конструкции реактора. На настоящем этапе авторы предполагают рассматривать применительно к РУ БРС-ГПГ характеристики активной зоны, аналогичные принятым для реакторных установок СВБР или БРЕСТ.

Целесообразно на последующих стадиях проработок БРС-ГПГ рассматривать возможность перегрузки ядерного топлива целиком в составе активной зоны, учитывая ограниченность ее размеров и имеющийся отечественный опыт перегрузки активных зон транспортных РУ, а также рассмотреть возможность размещения в корпусе реакторов блоков труб с материалами биологической защиты из гидрида металлов, что позволит уменьшить массогабаритные характеристики реакторного блока.

Остановка реактора и обеспечение стояночных режимов РУ

Главной задачей при остановке реактора является снижение фактической тепловой мощности реактора. Технически это достигается соответствующими системами. Для РУ с ТЖМТ проблема заключается в том, что температура кристаллизации свинца выше чем у любого из применяемых в настоящее время теплоносителей. В связи с этим требуются спе-

цифические технические решения для снятия тепла, что необходимо для безопасной работы установок в режиме расхолаживания. На высокотемпературных стендах специалистами НГТУ созданы и эффективно используются устройства регулирования температуры контура. В данных теплообменных устройствах для охлаждения используется воздушно-водяная смесь. Регулирование количества отводимой теплоты производится за счет изменения количества подаваемой воды в составе смеси, которое зависит от показаний ДАК и перепада температур на входе и на выходе из теплообменника. Характеристики такой системы исследуются и отрабатываются на стендах НГТУ, включая стенд ФТ-4 НГТУ для отвода тепла, вносимого электродвигателем модели ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 [14]. В БРС-ГПП рассматриваются размещение автономных воздушно-водяных теплообменников в корпусах ПГ, либо использование поверхностей испарителей ПГ в воздушно-водяном режиме [6].

В НГТУ экспериментально и расчетно-теоретически обосновывается принципиальная возможность эксплуатации РУ с замороженным на внутреннюю поверхность корпуса реактора слоем свинца системой, используемой также при расхолаживании реактора [15]. Такое решение исключает вытекание ТЖМТ из реакторного блока при его разрушении или при аварийной ситуации «разгерметизация реакторного корпуса».

Заключение

В результате расчетно-теоретических и экспериментальных исследований на высокотемпературных циркуляционных и статических стендах в НГТУ с расплавами свинца и свинца-висмута в качестве теплоносителей предложены новые нетрадиционные технические решения (компоновка оборудования и циркуляция ТЖМТ в реакторном контуре, горизонтальном парогенераторе, отвод тепловыделений и др.) реакторных установок малой и средней мощности, применимых к РУ БРС-ГПП [6].

Библиографический список

1. Белая книга ядерной энергетики / Под общ.ред. проф. Е.О.Адамова / М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2001.
2. **Джангобеков, В.В.** Реакторная установка СВБР-100 для модульных станций малой и средней мощности. Доклад на четвертой конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2013) / В.В. Джангобеков, В.С. Степанов, А.В. Дедуль, Н.Н. Климов, С.Н. Болванчиков, М.П. Вахрушин // АО «ГЦН РФ ФЭИ», г.Обнинск, РФ, 2013.
3. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАТ, 2007. – 433 с.
4. **Безносков, А.В.** Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков. – Н. Новгород, Литера, 2016. – 488 с.
5. **Безносков, А.В.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Н. Новгород: Литера, 2012. – 536 с.
6. **Безносков, А.В.** Обоснованные технические решения реактора установок БРС-ГПП малой и средней мощности со свинцовыми свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, П.А. Боков, Н.С. Волков, А.А. Карбышев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – №2. – 2017.
7. **Громов, Б.Ф.** Создание РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем для АПЛ. Краткая история. Обобщенные итоги эксплуатации / Б.Ф. Громов [и др.] // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: докл. конф. ГНЦ РФ ФЭИ. – Обнинск. 1998.
8. Патент РФ на изобретение №2320035РФ. Ядерная энергетическая установка / А.В. Безносков, А.А. Молодцов, Т.А. Бокова, и др., Бюл.№8, опублик. 20.03.2008.
9. **Безносков, А.В.** Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем и оптимизация

- его конструкции. / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.А. Молодцов // Известия вузов. Ядерная энергетика. РФ, Обнинск, 2006, №4. С. 3-11.
10. Патент РФ на изобретение №2313143РФ Ядерная энергетическая установка / А.В. Безносков, А.А. Молодцов, Т.А. Бокова и др. Бюл.№35, опубл. 20.12.2007.
 11. Патент РФ на полезную модель заявка № 2019121678/07РФ Ядерная энергетическая установка на быстрых нейтронах с охлаждением тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями плавучих атомных станций, судов и кораблей / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.Р. Маров, Е.Н. Кашина Дата подачи заявки 11.07.2019.
 12. **Безносков, А.В.** Регулирование качества свинцового теплоносителя реакторной установки БРС-ГПГ / А.В. Безносков, Н.С. Волков, А.Р. Маров, Т.А. Бокова, П.А. Боков // 21-я международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам // Сборник докладов. ОКБ «Гидропресс». – Подольск, 2019.
 13. Патент RU24748U1. Ядерная энергетическая установка / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, С.С. Пинаев, Назаров А.Д. Бюл.№23 опуб. 20.08.2002.
 14. **Безносков, А.В.** Определение характеристик теплообмена в теплообменниках низкого давления, применительно к контурам, охлаждаемым свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, А.С. Черныш, А.Д. Зудин, Т.А. Бокова, Э.Г. Новинский // Атомная энергия . – 2015. – Vol. 118. – No. 5. – P.266-271.
 15. Патент RU2339096C1. Ядерная энергетическая установка / А.В. Безносков, М.С. Кустов, С.Ю. Савинов Бюл.№32опуб. 20.11.2008.
 16. **Безносков, А.В.** Регулирование содержания кислорода в свинцовом теплоносителе реакторной установки БРС-ГПГ / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.И. Шумилков, Н.С. Волков, А.Р. Маров // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. – 2017. – № 5.
 17. **Безносков, А.В.** Контроль концентрации кислорода в свинцовом теплоносителе за счет падающих струй и капель на его свободную поверхность / А.В. Безносков, П.А. Боков, Н.С. Волков, О.Р. Журавлева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 4.

A.V. Beznosov, T.A. Bokova, P.A. Bokov, A.R. Marov, A.V. Lvov, N.S. Volkov

SUBSTANTIATION OF TECHNICAL SOLUTIONS OF THE REACTOR CIRCUIT OF THE BRS-GPG UNITS OF SMALL AND MEDIUM POWER WITH A HEAVY LIQUID METAL COOLANT FOR GROUND AND FLOATING NPPs

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The development of reactor facilities of the 4th generation of low and medium power with heavy liquid metal coolants.

Design/methodology/approach: The analysis is carried out on the basis of the experience in the creation and operation of reactor installations with lead-bismuth coolant, the design experience of reactor installations BREST and SVBR with lead and lead-bismuth coolant and research, primarily experimental, performed at the Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU) in rationale of small and medium power fast lead reactor with horizontal steam generators (BRS-GPG).

Findings: The paper presents the scientific and technical substantiation of the main components and assemblies of the installation, justifies the choice of coolant.

Research limitations/implications: With the proposed arrangement of the reactor circuit, the maximum possible natural circulation is achieved, which significantly increases the safety of reactor installation. The results of studies (simulations) of one of the most potentially dangerous accidents in reactor installation with HLMC – «large steam generator leak» allows to qualitatively reduce the consequences of the accident when using the design of a horizontal steam generator in which the pipe system is placed with minimal burial of pipes under the level of HLMC, which eliminates the flow of water into the reactor core, re-pressurization of the reactor loop, etc. The system options for technology of lead and lead-bismuth coolants are considered of the proposed reactor installation. It is probably advisable to consider in relation to the BRS-GPG characteristics of the core, similar to those adopted for the SVBR or BREST-OD-300 reactor installations. A system is proposed for cooling the reactor and providing shutdown modes, its characteristics are studied and tested at the NNSTU stands.

Originality/value: An original layout of the reactor installation equipment is proposed, which differs from the traditional layout solutions of reactor installations with HLMC. Thanks to it safety and profitability of BRS-GPG increases.

Keywords: fast neutron reactor, heavy liquid metal coolant (HLMC), BRS-GPG, steam generator, large steam generator leak, natural circulation, core, natural safety, coolant technology, floating nuclear power plant.