

ОБОРУДОВАНИЕ КОНТУРОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С ТЯЖЕЛЫМИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24*

Р

Реакторы со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями малой и средней мощности, разрабатываемые в настоящее время в России, относятся к четвертому поколению реакторов. Представлены анализ и новые научно-технические решения, соответствующие эволюционному развитию реакторных установок (РУ) малой и средней мощности с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ).

Возрастающий интерес к РУ малой и средней мощности для районов Заполярья, региональных и других АЭС, наметившаяся тенденция замены угольных котельных блочными малыми реакторами инициируют работы по исследованиям и разработке новых проектных и эксплуатационных решений установок с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ. Такие решения основываются на уникальном отечественном опыте создания и эксплуатации наземных стендов-прототипов и серийных РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем, а также энергоблоков атомных станций различного назначения. Эти решения придадут перспективным РУ с ТЖМТ лучшие качества прежде всего с точки зрения экономики и безопасности по сравнению с другими РУ малой и средней мощности.

В Нижегородском государственном техническом университете (НГТУ) проводились теоретические и экспериментальные работы в обоснование РУ малой и средней мощности с горизонтальными парогенераторами (БРС-ГПГ). Рассмотрены нетрадиционные научно-технические решения, направленные на повышение экономичности и безопасности энергоблоков АЭС с ТЖМТ, в том числе локализация потенциально опасной крупной аварии «межконтурная неплотность парогенератора». Представлены результаты анализа и комплекса исследований, позволяющие обосновать нетрадиционные технические решения РУ БРС-ГПГ (схемы циркуляции в реакторном контуре, тип парогенераторов, отвод тепловыделений от реакторного контура в стояночных и аварийных режимах и др.).

Ключевые слова: реакторная установка малой и средней мощности, основное оборудование, технические решения, тяжелые жидкометаллические теплоносители, межконтурная неплотность ПГ.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающий интерес к РУ малой и средней мощности (МСМ) для районов Заполярья, региональных и других АЭС, наметившаяся тенденция замены угольных котельных блочными малыми реакторами инициируют работы по исследованиям и разработке эволюционных, существенно новых проектных и эксплуатационных решений установок с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ). Такие решения основываются на уникальном отечественном опыте создания и эксплуатации наземных стендов-прототипов (27ВТ, 27ВТ-5, КМ1, АПЛ проекта 645) и серийных (АПЛ проектов 705 и 705К) РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем, а также энергоблоков атомных станций различного назначения со свинцово-висмутовым (БРС) и свинцовым (БРЕСТ) теплоносителями [1]. Низкое, близкое к атмосферному давление в реакторном контуре (0,1 – 0,5 МПа), высокая температура ТЖМТ (до 500 – 550°С) и генерируемого пара (400 – 500°С) при его давлении 4,0 – 24,0 МПа, высокие КПД энергоблока (до 45%), двухконтурная схема РУ, использование перспективных видов топлива (нитридного) делает целесообразным их рассмотрение в качестве перспективных установок.

С точки зрения безопасности РУ с ТЖМТ выгодно отличаются от установок с натриевым и водяным теплоносителями, имеют на единицу объема удельную запасенную энергию в 20 раз меньшую, чем в РУ с ВВЭР и в 10 раз меньшую, чем с натриевым теплоносителем. В установках с ТЖМТ отсутствует потенциальная «энергия сжатия», химическая энергия взаимодействия с цирконием, как у воды; с водой и воздухом, как у натрия, а также потенциальная энергия выделяющегося водорода с воздухом, как у воды и натрия [2].

В настоящее время в НГТУ выполняются обоснование технических решений и начальный этап разработок установки в мощном диапазоне от 50 до 250 МВт (эл.) и реактором на быстрых нейтронах с горизонтальными парогенераторами (БРС-ГПГ), охлаждаемым свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем [3].

Результаты анализа и комплекса исследований, выполненных в НГТУ, прежде всего экспериментальных, 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.) представлены ниже.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Технологии проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем успешно отработаны в нашей стране применительно к эксплуатирующимся опытной (проекта 645) и серийным (проектов 705 и 705К) атомным подводным лодкам. Этот теплоноситель совместим с водой в качестве рабочего тела в цикле Ренкина. Температура его плавления 125°С соответствует давлению насыщения водяного пара 0,23 МПа, что позволяет надежно осуществить отвод тепла от оборудования с этим теплоносителем водой при давлении более 0,3 МПа без его замораживания [4].

Это позволяет обеспечивать расхолаживание РУ и при необходимости обогрев элементов реакторного контура водой и паром в стояночных и переходных режимах с исключением возможности застывания жидкометаллического теплоносителя. Такое свойство эвтектики Pb-Bi существенно улучшает ее потребительские качества. По сравнению со свинцовым недостатком свинцово-висмутового теплоносителя является высокий уровень активности при работе РУ по Ро-210, который в 20 тысяч раз выше, чем в контуре со свинцовым теплоносителем, а также высокая стоимость

висмута, на порядок большая, чем у свинца.

Температура плавления свинца 326°C соответствует давлению насыщенного пара около 12,2 МПа. Это практически исключает возможность отвода тепла водой от оборудования со свинцовым теплоносителем при расхолаживании РУ и в стояночных режимах, так как снижение давления в полости с водой ниже этой величины приведет к застыванию свинца и прекращению проходимости канала в полости со свинцом. Поддержание давления, большего 12,3 МПа в полостях парогенераторов или других теплообменниках в переходных, стояночных и ремонтных режимах технически сложно и практически невозможно, что делает этот теплоноситель плохо совместимым с водой. Обширный опыт эксплуатации стендов со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями при электрообогреве систем с ТЖМТ не показывает заметной разницы в их обслуживании.

По остальным характеристикам свинец и свинец-висмут в качестве теплоносителей РУ практически идентичны. Исходя из критериев экономичности и безопасности применение свинцового теплоносителя, вероятно, более обоснованно, чем свинцово-висмутового [5].

СХЕМА ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ РЕАКТОРНОГО КОНТУРА И КОМПОНОВКА РЕАКТОРНОГО БЛОКА

В БРС-ГПГ предлагается новая нетрадиционная организация компоновки реакторного контура и циркуляции теплоносителя, минимизирующая его протяженность при исключении дополнительных подъемно-опускных участков [5].

Теплоноситель, пройдя активную зону реактора, поступает в пароперегревательную, затем в испарительную секции парогенератора и далее в осевой главный циркуляционный насос погружного типа, с напора которого опускается на вход в активную зону реактора (рис. 1).

При такой компоновке реакторного контура достигается максимально возможная естественная циркуляция, что существенно повышает безопасность РУ.

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РУ ПРИ АВАРИИ «БОЛЬШАЯ ТЕЧЬ ПГ»

Экспериментами с вводом относительно больших подач воды, пара, газа (килограмм и более) под свободный уровень свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей с заглублением отверстия истечения до 4,0 м под уровень ТЖМТ и перепадом давления на отверстии истечения воды, пара в ТЖМТ до 8,0 МПа с температурой ТЖМТ до 600°C показано, что пар, пароводяная смесь самопроизвольно организуют вертикальный канал «легкой фазы» от места истечения до свободного уровня ТЖМТ (кризис барботажа второго рода) независимо от наличия и скорости исходной циркуляции ТЖМТ [6]. Этот результат исследования (моделирования) одной из наиболее потенциально опасных аварий в РУ с ТЖМТ – «большая течь парогенератора» позволяет качественно уменьшить последствия аварии при применении конструкции горизонтального парогенератора, в котором трубную систему располагают с минимальным заглублением труб под уровень ТЖМТ (до ~ 1,0 м), что позволяет исключить поступление воды в активную зону реактора, переопрессовку реакторного контура и др. [7]. Такое решение в случае аварийного разрушения («большой течи») ПГ при практически максимально возможном расходе аварийного истечения рабочего тела обеспечивает безопасную локализацию аварии при самопроизвольной организации парового канала от места истечения рабочего тела до газового (парогазового) объема над свободным уровнем теплоносителя в аварийной секции ПГ и с последующим выходом пара, воды, газа через разрывную мембрану в конденсатор и через него и систему газоочистки в атмосферу [8].

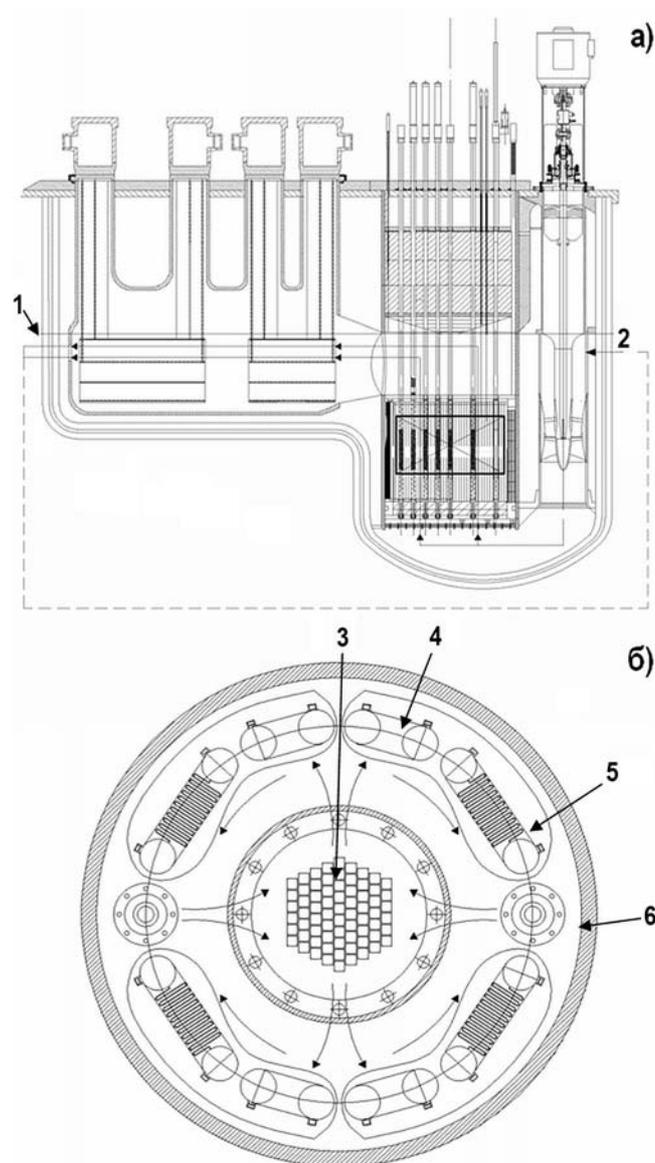


Рис. 1. Конструктивная схема контура ТЖМТ РУ БРС-ГПГ: а) продольный разрез; б) вид сверху; 1 – свободный уровень теплоносителя; 2 – вход теплоносителя в насос из ПГ; 3 – активная зона; 4 – пароперегревательный участок горизонтального парогенератора; 5 – испарительный участок горизонтального парогенератора; 6 – главный циркуляционный насос

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА

Для РУ БРС-ГПГ оптимальной является конструкция с минимальным заглублением труб под свободный уровень ТЖМТ, например, в виде системы плоских змеевиков с поперечным обтеканием труб потоком ТЖМТ и устройствами, минимизирующими его стратификацию. В НГТУ выполнены работы по экспериментальному определению характеристик теплообмена горизонтальной трубной системы при обтекании ее свинцовым теплоносителем [9]. В рассматриваемом варианте пароперегревательная и испарительная секции могут размещаться в кольцевом канале выше активной зоны реактора [3]. Особенностью ПГ в БРС-ГПГ является то, что для эффективной локализации аварии «боль-

шая течь ПГ» газовый объем под свободным уровнем в секциях ПГ больше или равен объему теплоносителя в этих секциях и сообщен через разрывную мембрану с конденсатором, например, с барботажным баком, газовый объем которого сообщен с атмосферой через систему газоочистки. Для эффективной работы в режиме «малой течи ПГ» газовый объем каждой секции ПГ сообщается с аварийными конденсаторами пара и газодувкой.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА

Применительно к РУ БРС-ГПГ предлагается конструкция осевого погружного насоса с потоком теплоносителя «сверху-вниз» [10]. В НГТУ проводятся исследования, направленные на обоснованное проектирование ГЦН РУ БРС-ГПГ, поэтапно включающие в себя экспериментальное определение

- основных характеристик решеток профилей рабочего колеса насоса, вызываемых циркуляцией скорости при обтекании лопаток потоком свинцового теплоносителя, расходом до 2000 т/ч и температурой 450 – 500°С, и оптимального варианта конструкции рабочего колеса [11];
- оптимального профиля лопатки рабочего колеса в решетке профилей, определенной на первом этапе;
- характеристик и оптимальной геометрии участка подвода и отвода насоса, включая выпрямляющий аппарат.

Для экспериментального определения оптимальных углов установки лопаток рабочего колеса в НГТУ разработана и проходит испытания конструкция осевого электронасоса НСО-02 НГТУ (G до 2000 т/ч, $T = 450 - 500^{\circ}\text{C}$, рабочая среда – Pb, эвтектика Pb-Bi). В случае необходимости поворот лопаток моделируемого ГЦН может использоваться для перекрытия «обратного» тока через ГЦН при его аварийной остановке в РУ или для минимизации гидравлического сопротивления ГЦН при естественной циркуляции ТЖМТ в реакторном контуре [12].

РАСХОЛАЖИВАНИЕ РЕАКТОРА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТОЯНОЧНЫХ РЕЖИМОВ РУ

Высокая температура застывания свинцового теплоносителя и в меньшей мере свинцово-висмутового требует специфических технических решений надежного и безопасного теплоотвода при расхолаживании и в стояночных режимах РУ [13]. Предложено использовать на стендах и в РУ БРС-ГПГ для регулируемого отвода тепла от ТЖМТ воздушно-водяную смесь с мелкодисперсными каплями воды [14]. Количество отводимого тепла эффективно регулируется изменением содержания воды в двухкомпонентном потоке по сигналам от датчиков и температуры на выходе из теплообменника [15]. 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 [16]. В БРС-ГПГ рассматривается размещение автономных воздушно-водяных теплообменников в корпусах ПГ либо использование поверхностей испарителей ПГ в воздушно-водяном режиме [17].

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЖМТ РУ БРС-ГПГ

В процессе эксплуатации РУ с ТЖМТ конструкционный материал (сталь) контактирует с теплоносителем через защитное покрытие (оксидное, возможно, другое), формируемое на его поверхности для обеспечения его работоспособности при $T \geq 400 - 450^{\circ}\text{C}$, а также через пристенный слой, характеристики которого определяют процессы массообмена и массопереноса примесей как в контуре, так и на локальном рассматриваемом его участке [18].

Пристенный слой, как показали прямые эксперименты [18], представляет собой дисперсную систему с поверхностными свойствами, в состав которой входят жидкометаллический теплоноситель (жидкая фаза) и частицы примесей (твердая фаза – оксиды и другие соединения теплоносителя, компоненты сталей и их соединения и др.).

Исходя из этого предполагается определять стойкость конструкционных материалов реакторного контура БРС-ГПГ в условиях их контакта, в том числе теплового и гидродинамического с пристенным слоем и ТЖМТ конкретного участка. В настоящее время обоснована работоспособность ферритно-мартенситных и аустенитных хромоникелевых сталей применительно к условиям реакторного контура БРС-ГПГ при содержании в ТЖМТ термодинамически активного кислорода 10^{-4} – 10^{-2} , обеспечивающего формирование и доформирование соответствующих защитных оксидных покрытий на поверхностях сталей [19 – 21].

ТЕХНОЛОГИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

В реакторном контуре предполагается установка нескольких датчиков оперативного контроля термодинамической активности кислорода в ТЖМТ. По соответствующим сигналам от этих датчиков предполагается обеспечивать мониторинг контура и на его основе работоспособность защитных оксидных покрытий путем ввода кислорода в той или иной форме (вводом газообразного кислорода и др.). По сигналам от датчиков предполагается очистка теплоносителя и контура от оксидов теплоносителя водородосодержащими газовыми смесями. Операции по оперативному контролю и регулированию содержания кислорода в ТЖМТ и в реакторном контуре хорошо отработаны в стендовых и реакторных условиях транспортных РУ [19].

В качестве одного из вариантов устройств регулирования содержания кислорода в ТЖМТ для поддержания защитных оксидных покрытий и очистки теплоносителя от оксидов ТЖМТ в БРС-ГПГ предлагается осуществлять новым нетрадиционным устройством – газовым массообменником [22]. В этом устройстве по соответствующим сигналам от активометра осуществляется ввод мелкодисперсной газовой фазы (восстановительной – в смеси с водородом или окислительной – в смеси с кислородом) в объем и далее в поток жидкометаллического теплоносителя за счет захвата мелких пузырьков газа струями ТЖМТ, поступающими на свободную поверхность теплоносителя в районе его входа в ГЦН. Мелкодисперсная газовая фаза в составе двухкомпонентного потока после ГЦН поступает в активную зону и далее в секции парогенератора. Такой массообменник исследован на стендах с ТЖМТ в НГТУ и использовался в качестве штатного устройства в установке для испытаний и отработки моделей проточной части ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 (на стенде ФТ-4 НГТУ) с номинальным расходом до 2000 т/ч свинцового теплоносителя [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены и рассмотрены новые технические решения контуров реакторных установок малой и средней мощности с жидкометаллическими теплоносителями, направленные на повышение их безопасности и экономичности.

Литература

1. Безносков А.В., Бокова Т.А. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / НГТУ. – Н.Новгород: Литера, 2012. – 536 с.
2. Безносков А.В., Бокова Т.А., Боков П.А. Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями / НГТУ. – Н.Новгород: Литера, 2016. – 488 с.
3. Безносков А.В., Молодцов А.А., Бокова Т.А., Степанов В.С., Климов Н.Н., Болванчиков С.Н.

Ядерная энергетическая установка. Патент РФ на изобретение № 2320035 РФ. Бюл. № 8, опубл. 20.03.2008.

4. *Безносов А.В., Бокова Т.А., Молодцов А.А.* Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем и оптимизация его конструкции. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 4. – С. 3-11.

5. *Безносов А.В., Молодцов А.А., Бокова Т.А., Степанов В.С., Климов Н.Н., Болванчиков С.Н.* Ядерная энергетическая установка. Патент РФ на изобретение № 2313143 РФ. Бюл. № 35, опубл. 20.12.2007.

6. *Безносов А.В., Бокова Т.А., Новожилова О.О., Мелузов А.Г., Метринский Р.А., Новинский Э.Г.* Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора в эксплуатационно-безопасных пределах в РУ с ТЖМТ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 2. – С. 154-162.

7. *Безносов А.В., Новожилова О.О., Молодцов А.А., Ярмонов М.В., Боков П.А., Назаров А.В.* Реакторные установки с горизонтальными парогенераторами // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2013. – № 2. – С. 79-83.

8. *Безносов А.В., Бокова Т.А., Новожилова О.О., Матюнин А.К., Химич В.Л., Пичков С.Н.* Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих аварию «межконтурная неплотность ПГ» в РУ с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 4. – С. 92-101.

9. *Iarmonov M., Novozhilova O., Vokov P., Beznosov A.V.* Experimental studies of thermal hydraulics of a HLMC flow around heat exchange surfaces, DOI: 10.1115/ICONE21-15248, International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE. 2013.

10. *Безносов А.В., Боков П.А., Львов А.В., Лемехов В.В., Назаров А.В., Скобликов Е.О.* Патент РФ на изобретение RU(11)139703(13)U1. Ядерная энергетическая установка. Бюл. № 11, опубл. 20.04.2014.

11. *Vokov P.A., Beznosov A.V., Lvov A.V., Iarmonov M.V., Vokova T.A.* The study of cavitation characteristics of a heavy liquid-metal coolant, DOI: 10.1115/ICONE21-15263, International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE, 2013.

12. *Безносов А.В., Новожилова О.О., Ярмонов М.В., Львов А.В., Химич В.Л., Матюнин А.К.* Экспериментальные исследования естественной циркуляции в системах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 6. – С. 351-354.

13. *Безносов А.В., Бокова Т.А., Пинаев С.С., Назаров А.Д.* Ядерная энергетическая установка. Патент RU24748U1. Бюл. №23, опубл. 20.08.2002.

14. *Безносов А.В., Черныш А.С., Зудин А.Д., Бокова Т.А., Новинский Э.Г.* Определение характеристик теплообмена в теплообменниках низкого давления, применительно к контурам, охлаждаемым свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – № 5. – С. 266-271.

15. *Безносов А.В., Бокова Т.А., Зудин А.Д., Львов А.В., Соловьев А.О., Черныш А.С.* Пути регулирования термодинамической активности кислорода свинцового теплоносителя. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 3 (105). – С. 130-138.

16. *Безносов А.В., Новожилова О.О., Молодцов А.А., Савинов С.Ю., Бокова Т.А., Химич В.Л.* Характеристики теплообмена моделей поверхностей активной зоны и парогенератора при регулировании содержания примесей в контуре со свинцовым теплоносителем // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104. – № 2. – С. 74-80.

17. *Безносов А.В., Черныш А.С., Сергеев С.И., Зудин А.И., Бокова Т.А.* Экспериментальное исследование теплоотвода от ТЖМТ охлаждающей средой при атмосферном давлении. // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2016. – № 4. – С. 75-83.

18. *Безносов А.В., Дроздов Ю.Н., Бокова О.О., Новожилова О.О., Ярмонов М.В., Махов К.А.* Триботехнические исследования зон контакта в среде свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей. // Вестник машиностроения. – 2012. – № 1. – С. 43-46.

19. *Безносов А.В., Боков П.А., Зефирова М.Д., Баранова В.С., Кустов М.С., Леонов В.Н.* Экспериментальные исследования регулирования окислительного потенциала в контуре свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей газовым массообменником. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 2. – С. 134-141.

20. *Безносов А.В., Семенов А.В., Баранова О.С.* Способ защиты конструкционных сталей от коррозии в свинцовом теплоносителе и его расплавах. / Патент на полезную модель № 107848, Россия, 2005. Дата регистрации 10.09.2006.

21. *Безносов А.В., Боков П.А., Черныш А.С., Костин М.В., Зудин А.Д.* Ядерная энергетическая установка. / Патент на полезную модель № 137152, Россия. Дата регистрации 27.01.2014.

22. *Безносов А. В., Бокова Т.А., Боков П.А., Баранова В.С.* Ядерная энергетическая установка. / Патент на полезную модель № 78002, Россия 2008. Дата регистрации 10.11.2008.

Поступила в редакцию 13.02.2017 г.

Авторы

Безносов Александр Викторович, профессор, доктор техн. наук

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Бокова Татьяна Александровна, доцент

E-mail: tatabo@bk.ru

Боков Павел Андреевич, ассистент

E-mail: bokow_pavel@mail.ru

UDC 621.039.534

COMPONENTS OF SMALL AND MEDIUM SIZED HLHC REACTOR PLANT CIRCUITS

Beznosov A.V., Bokova T.A., Bokov P.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseyev

24 Minin st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia

ABSTRACT

Small and medium sized lead and lead-bismuth cooled reactors currently under development in Russia are reactors of generation IV. This paper presents a review and new science and technology solutions in line with the evolution of small and medium sized heavy liquid metal cooled (HLHC) reactor plants.

The growing interest in small and medium sized reactors for transpolar applications, as well as in regional and other nuclear power plants, including the emerging trend for the replacement of coal-fired boiler stations with small reactor units initiates the R&D activities on new design and operating concepts of fast-neutron HLHC reactors. Such concepts are based on the unique domestic experience in building and operating ground prototype facilities and series reactors with lead-bismuth coolants, as well as on the experience of building nuclear power units for different applications. The solutions in question improve the qualities of advanced HLHC reactors, primarily in economic and safety terms, as compared to other small and medium sized reactor facilities. Low, nearly atmospheric, reactor circuit pressure (0.1 – 0.5 MPa), small thickness of the circuit walls, high temperature of the HLHC (up to 500 – 550°C) and the generated steam (400 – 500°C) with a pressure of 4.0 to 24.0 MPa, high unit efficiencies (up to 45%), a two-circuit reactor design, use of nitride fuel and other advanced solutions provide for qualitatively improved and more competitive economics of these units.

Theoretical and experimental work was performed at Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU) to justify a small and medium sized reactor plant with horizontal heat exchangers (BRS-GPG). Nonconventional science and technology solutions were considered for improving the effectiveness and safety of HLHC power

units, including the localization of a potentially hazardous severe accident of the “steam generator intercircuit seal breakdown” type. The paper presents the results of an analysis and an integrated research to support nonconventional designs for the BRS-GPG reactor plant (reactor circuit circulation patterns, steam generator type, reactor circuit heat removal in standby and emergency modes, etc.).

Key words: small and medium sized reactor plant, main components, technical solutions, heavy liquid metal coolants, SG intercircuit seal breakdown.

REFERENCES

1. Beznosov A.V., Bokova T.A. Equipment of power circuits with heavy liquid metal coolants in nuclear power. N.Novgorod. Litera Publ., 2012, 536 p. (in Russian).
2. Beznosov A.V., Bokova T.A., Bokov P.A. Technologies and main components for circuits of reactor plants and commercial and research facilities with lead and lead-bismuth coolants. N.Novgorod. Litera Publ., 2016, 488 p. (in Russian).
3. Beznosov A.V., Molodtsov A.A., Bokova T.A., Stepanov V.S., Klimov N.N., Bolvanchikov S.N. Nuclear power plant. Russian Federation patent of invention No. 2320035 RF. Bul. No. 8, published 03.20.2008 (in Russian).
4. Beznosov A.V. Bokova T.A., Molodcov A.A. Experimental studies into the processes accompanying the intercircuit seal breakdown in a steam generator with lead or lead-bismuth coolant and optimization of its design. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2006, no. 4, pp. 3-11 (in Russian).
5. Beznosov A.V., Molodtsov A.A., Bokova T.A., Stepanov V.S., Klimov N.N., Bolvanchikov S.N. Nuclear power plant. Russian Federation patent of invention No. 2313143 RF. Bul. No. 35, published 12.20.2007 (in Russian).
6. Beznosov A.V., Bokova T.A., Novozhilova O.O., Meluzov A.G., Metrinskij R.A., Novinskij E.G. Experimental studies into the processes accompanying the steam generator intercircuit seal breakdown within operationally safe limits in an HLMC reactor facility. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2016, no. 2, pp. 154-162 (in Russian).
7. Beznosov A.V., Novozhilova O. O., Molodcov A.A., Jarmonov M.V., Bokov P.A., Nazarov A.V. Reactor plants with horizontal steam generators. *VANT. Ser.: Fizika Yadernykh Reaktorov*, 2013, no. 2, pp. 79-83 (in Russian).
8. Beznosov A.V., Bokova T.A., Novozhilova O.O., Matjunin A.K., Khimich V.L., Pichkov S.N. Experimental studies into the processes accompanying the SG intercircuit seal breakdown accident in heavy liquid metal cooled reactor facilities. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2012, no. 4, pp. 92-101 (in Russian).
9. Jarmonov M., Novozhilova O., Bokov P., Beznosov A.V. *Experimental studies of thermal hydraulics of a HLMC flow around heat exchange surfaces*, DOI: 10.1115/ICONE21-15248, International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE. 2013.
10. Beznosov A.V., Bokov P.A., Lvov A.V., Lemekhov V.V., Nazarov A.V., Skoblikov E.O. Nuclear power plant. Russian Federation patent of invention RU(11)139703(13)U1. Bul. No. 11, published 04.20.2014 (in Russian).
11. Bokov P.A., Beznosov A.V., Lvov A.V., Jarmonov M.V., Bokova T.A. *The study of cavitation characteristics of a heavy liquid-metal coolant*, DOI: 10.1115/ICONE21-15263, International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE, 2013.
12. Beznosov A.V., Novozhilova O.O., Jarmonov M.V., L'vov A.V., Himich V.L., Matjunin A.K. Experimental studies into natural circulation in lead and lead-bismuth cooled systems. *Atomnaya energiya*, 2012, v. 113, no. 6, pp. 351-354 (in Russian).
13. Beznosov A.V., Bokova T.A., Pinaev S.S., Nazarov A.D. Nuclear power plant. Patent RU24748U1. Bul. No. 23, published 08.20.2002] (in Russian).
14. Beznosov A.V. Chernysh A.S., Zudin A.D., Bokova T.A., Novinskij E.G. Characterization of heat exchange in low-pressure heat exchangers as applied to lead and lead-bismuth cooled circuits. *Atomnaya energiya*, 2015, v. 118, no. 5, pp. 266-271 (in Russian).
15. Beznosov A.V., Bokova T.A., Zudin A.D., L'vov A.V., Solov'jov A.O., Chernysh A.S. Ways to

regulate the lead coolant oxygen thermodynamic activity. *Proceedings of NNSTU n. a. R.E. Alekseyev*, 2014, no. 3 (105), pp. 130-138 (in Russian).

16. Beznosov A. V., Novozhilova O. O., Molodcov A. A., Savinov S. Yu., Bokova T. A., Himich V. L. Heat-exchange characteristics of the core and steam generator surface models in regulating the content of impurities in a lead coolant circuit. *Atomnaya energiya*, 2008, v. 104, no. 2, pp. 74-80 (in Russian).

17. Beznosov A. V., Chernysh A. S., Sergeev S. I., Zudin A. I., Bokova T. A. Experimental study into the heat removal from HLHC by cooling fluid at atmospheric pressure. *VANT. Ser.: Yaderno-reaktornye konstanty*. 2016, no. 4, pp. 75-83 (in Russian).

18. Beznosov A. V., Drozdov Yu. N., Bokova T. A., Novozhilova O. O., Yarmonov M. V., Mahov K. A. Tribotechnical studies of contact areas in the lead and lead-bismuth coolant environment. *Vestnik mashinostroeniya*, 2012, no. 1, pp. 43-46 (in Russian).

19. Beznosov A. V., Bokov P. A., Zefirov M. D., Baranova V. S., Kustov M. S., Leonov V. N. Experimental study into the regulation of the oxidizing potential in a lead and lead-bismuth coolant circuit using a gas mass exchanger. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2010, no. 2, pp. 134-141 (in Russian).

20. Beznosov A. V., Semjonov A. V., Baranova O. S. A method to protect structural steels against corrosion in lead coolant and its melts. Utility model patent No. 107848, Russia, 2005. Reg. date 09.10.2006 (in Russian).

21. Beznosov A. V., Bokov P. A., Chernysh A. S., Kostin M. V., Zudin A. D. Nuclear power plant. Utility model patent No. 137152, Russia. Reg. date 01.27.2014 (in Russian).

22. Beznosov A. V., Bokova T. A., Bokov P. A., Baranova V. S. Nuclear Power Plant. Utility model patent No. 78002, Russia, 2008. Reg. date 11.10.2008 (in Russian).

Authors

Beznosov, Aleksander Viktorovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Bokova, Tatyana Aleksandrovna, Assistant Professor

E-mail: tatabo@bk.ru

Bokov, Pavel Andreyevich, Assistant

E-mail: bokow_pavel@mail.ru