

УДК 621.039

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, П.А. Боков, Н.С. Волков, А.А. Карбышев

ОБОСНОВАННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ РЕАКТОРА УСТАНОВОК БРС-ГПГ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ СО СВИНЦОВЫМ И СВИНЕЦ-ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены новые технические решения реакторного контура типа БРС-ГПГ, отличающие их от транспортных и стационарных реакторных установок малой и средней мощности с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями и соответствующие эволюционному развитию таких установок.

При разработке указанных решений использовался имеющийся опыт создания и эксплуатации советских опытных и серийных энергетических установок со свинец-висмутовыми теплоносителями и исследований, прежде всего, экспериментальных, выполняемых в Нижегородском государственном техническом университете им.Р.Е.Алексеева (НГТУ) в обоснование предложенного и прорабатываемого в НГТУ мощностного ряда (50-250 МВт) реакторных установок малой и средней мощности с горизонтальными парогенераторами (БРС-ГПГ).

Ключевые слова: реактор малой и средней мощности, горизонтальный парогенератор, насос, безопасность, экономичность, течь парогенератора

Введение

Одним из направлений, обеспечивающих решения климатической конференции в Париже – COP21, является замена выводимых из эксплуатации угольных станций блочными малыми реакторами. Это позволяет удешевить проект за счёт использования готовой инфраструктуры. Возможно использование малых атомных станций на северных территориях, островах, в изолированных энергосистемах, для опреснения воды. Всё это инициирует исследования и разработку существенно новых, с улучшенными показателями экономичности и безопасности установок с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ).

Такие решения основываются на технологиях, используемых уникальный российский опыт создания и эксплуатации энергетических блоков наземных стендов-прототипов (27ВТ, 27ВТ-5, КМ-1), опытной (пр.605) и серийных (пр.705 т 705К) атомных подводных лодок с реакторами, охлаждаемыми свинец-висмутовым теплоносителем. В настоящее время накоплен значительный международный опыт исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию энергоблоков атомных станций различного назначения со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями.

С точки зрения безопасности, реакторные установки (РУ) с ТЖМТ выгодно отличаются от установок с натриевым и водяным теплоносителями, имеют на одну единицу объема удельную запасённую энергию, в 20 раз меньшую, чем в РУ ВВЭР, и в 10 раз меньшую, чем в РУ с натриевым теплоносителем. В установках с ТЖМТ отсутствует потенциальная «энергия сжатия», химическая энергия взаимодействия с цирконием, как у воды; потенциальная энергия выделяющегося водорода с воздухом, как у воды и натрия и др.

С точки зрения экономичности, энергоблоки с ТЖМТ выгодного отличаются от РУ на воде и натрии, являются конкурентоспособными, по сравнению с установками на дешёвом углеводородном топливе. Высокая экономичность блоков с ТЖМТ достигается за счёт высокого КПД энергоблока (до 45%), высокой освоенной температуры ТЖМТ (до 500-550⁰С) и, соответственно, генерируемого пара (400-520⁰С) при его давлении 4,0-24,0 МПа, низкого близкого к атмосферному давлению в реакторном контуре (0,1-0,5 МПа) и, соответственно, малой толщине стенок, двухконтурной схемы РУ, за счёт использования перспективных ви-

дов топлива (нитридного) и других перспективных решений, за счет использования в энергоблоках типовых, стандартных паротурбинных установок.

В настоящее время в НГТУ выполняются работы по обоснованию новых, нетрадиционных технических решений и начальный этап разработок мощностного ряда установок типа БРС-ГПП в мощностном диапазоне от 50 до 250 МВт (эл.) с реактором на быстрых нейтронах, охлаждаемым свинцовым или свинец-висмутовым теплоносителями с горизонтальными парогенераторами.

Выбор и обоснование теплоносителя

Технологии создания и эксплуатации энергетических реакторных установок со свинец-висмутовыми теплоносителями успешно отработаны в России. Общее время работы таких реакторов превышает 500 реакторолет. Этот теплоноситель совестим с водой в качестве рабочего тела в цикле Ренкина. Температура его плавления 125°C соответствует давлению насыщенного водяного пара 0,23 МПа, что позволяет надёжно осуществлять отвод тепла водой в оборудовании с этим теплоносителем при эксплуатационно приемлемым её давлением более 0,3 МПа без застывания теплоносителя. Это, в свою очередь, позволяет обеспечивать рахолаживание реактора и при необходимости обогрев элементов реакторного контура водой и паром в стояночных и переходных режимах при исключении возможности застывания жидкого металла в реакторном контуре. Это свойство эвтектики Pb-Bi существенно улучшает её потребительские качества, по сравнению со свинцом. Недостатком свинец-висмутового теплоносителя является высокий уровень активности при работе реактора по изотопу Po-210, который в 20 тысяч раз выше, чем активность в контуре свинцового теплоносителя, а также стоимость висмута на порядок больше чем у свинца.

Температура плавления свинца 326°C соответствует давлению насыщенных паров ок. 12,2 МПа. Это практически исключает возможность отвода тепла водой от оборудования со свинцовым теплоносителем при расхолаживании реактора и в стояночных режимах, так как снижение давления в полости воды ниже этой величины приведёт к застыванию теплоносителя и прекращению проходимости канала в полости со свинцом. Поддержание давления большего 12,3 МПа в полостях парогенератора 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 свинец-висмутовым теплоносителем при электрообогреве трубопроводов и оборудования с ТЖМТ не показывает заметной разницы в их обслуживании.

По остальным характеристикам свинец и свинец-висмут в качестве теплоносителей реакторных установок практически идентичны. Исходя из критериев экономичности и безопасности, применение при современных технологиях свинцового теплоносителя, вероятно, более обосновано, чем свинец-висмутового в установках малой и средней мощности (в РУ БРС-ГПП).

Схема циркуляции теплоносителя в реакторном контуре и компоновка реакторного блока

В РУ типа БРС-ГПП предлагается новая нетрадиционная для ТЖМТ компоновка реакторного контура и циркуляция теплоносителя, минимизирующая его протяжённость и включающая дополнительные подъёмно-опускные участки [1]. Циркуляция теплоносителя осуществляется следующим образом. Пройдя активную зону, свинец поступает в пароперегревательную, затем в испарительную секции горизонтального парогенератора со свободным уровнем теплоносителя и далее в осевой главный циркуляционный насос погружного типа, с напора которого опускается на вход активную зону (рис. 1 и рис. 2).

При такой компоновке реакторного контура достигается максимально возможная естественная циркуляция теплоносителя, что существенно повышает безопасность реакторной установки. При этом повышение экономичности энергоблока возможно как за счёт макси-

мальной величины её удельной мощности, так и за счёт минимальных массогабаритных характеристик реакторного контура.

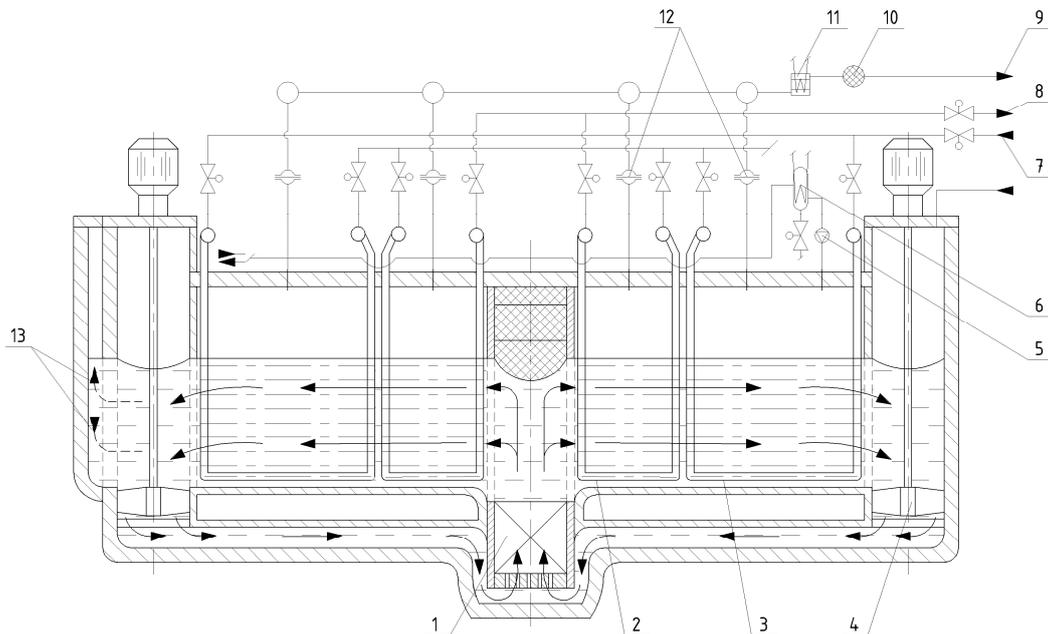


Рис. 1. Принципиальная схема реакторного контура БРС-ГПП:

- 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 газа в атмосферу; 10 – фильтр; 11 – конденсатор; 12 – мембрана разрывная;
13 – к системе стояночного и аварийного теплоотвода

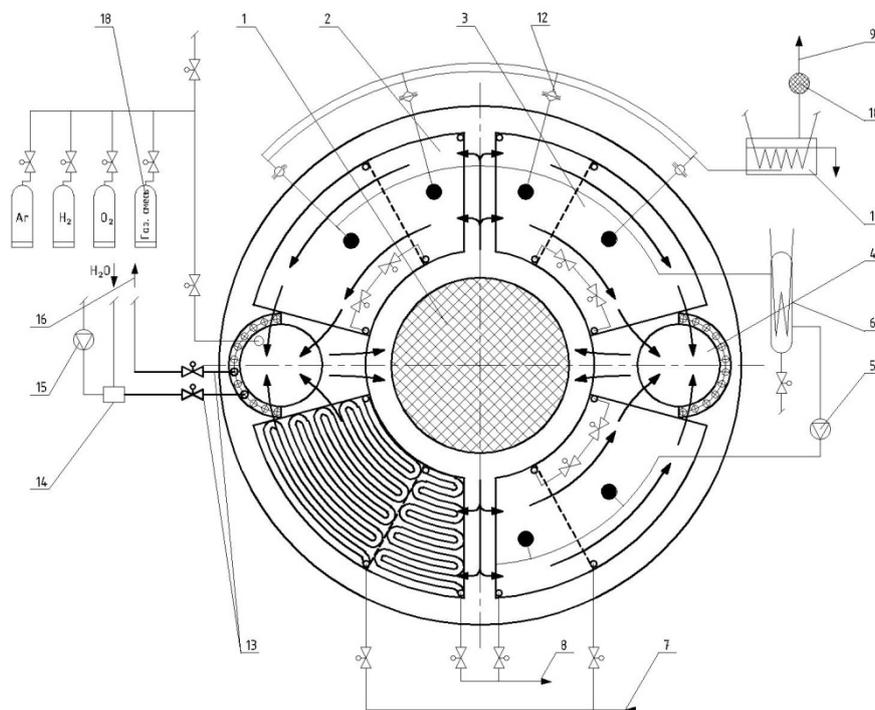


Рис. 2. Принципиальная схема реакторного контура БРС-ГПП. Вид сверху:

- 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 стояночного и аварийного теплоотвода; 14 – смеситель; 15 – компрессор; 16 – отвод воздухо – паровой смеси

Обеспечение безопасности энергоблока при аварии «большая течь парогенератора»

Экспериментами с вводом относительно больших подач воды, пара (килограмм и более) с заглублением отверстий истечения до 4,0 м под свободный уровень ТЖМТ с температурой до 600⁰С при перепаде давления на этом отверстии истечения до 8,0 МПа показано, что пар, пароводяная смесь самостоятельно организуют вертикальный канал «легкой фазы» от места истечения до свободного уровня ТЖМТ, независимо от наличия и скорости циркуляции ТЖМТ [2, 3].

Этот результат исследования (моделирования) одной из наиболее потенциально опасных аварий в установках с ТЖМТ – «большая течь парогенератора» позволяет предложить техническое решение, которое качественно изменит протекание такой аварии, обеспечив безопасность энергоблока при её возникновении. Применение парогенератора (горизонтального), трубная система которого располагается с минимальными (до 1,0 м) заглублением под свободный уровень ТЖМТ обеспечивает самопроизвольную организацию канала «легкой фазы» от места поступления рабочего тела в ТЖМТ до газового (парогазового) объема над свободным уровнем теплоносителя в аварийной секции парогенератора. Далее пар, вода, газ через разрывную мембрану поступают в конденсатор, откуда через систему газоочистки газ поступает в атмосферу (рис. 1, 2), а конденсат в цистерну «грязных вод» [2, 10]. Применение такого технического решения придает установке типа БРС-ГПГ принципиально новые качества безопасности, по сравнению с другими установками с ТЖМТ.

Технические решения парогенератора

Все парогенераторы, эксплуатировавшиеся в составе установок атомных подводных лодок, были с продольным обтеканием теплоносителем теплообменных труб, U-образного типа. В парогенераторах установок типа СВБР приняты трубы Фильда; в установках типа БРЕСТ – змеевиковые с малым углом наклона змеевика.

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 её высокотемпературным свинцовым теплоносителем [3]. Трубные системы пароперегревательной и испарительной секций размещаются в кольцевом канале выше активной зоны реактора [4]. Газовый объем над свободным уровнем ТЖМТ равен или более объема теплоносителя в секции. Объем каждой секции через разрывную мембрану сообщён с конденсатором пара, например, с барботажным баком, газовый объем которого сообщён с атмосферой через систему газоочистки (рис. 1 и рис. 2).

Газовый объем секций парогенератора сообщается с аварийными конденсаторами и газодувкой, что делает принципиально возможной эксплуатацию энергоблока на мощностном уровне в аварийном режиме «малая течь парогенератора».

Технические решения главного циркуляционного насоса

Исходя их соотношения напора и подачи ТЖМТ в установке БРС-ГПГ к разработке выбрана конструкция осевого погружного насоса с направлением потока теплоносителя «сверху-вниз», что обусловлено принятой компоновкой реакторного контура. В НГТУ проводятся исследования, направленные на обоснованное проектирование главного циркуляционного насоса БРС-ГПГ, поэтапно включающие:

- экспериментальное определение на натурной среде основных характеристик решёток профилей модели рабочего колеса насоса, вызываемых циркуляцией скорости при обтекании лопаток свинцовым теплоносителем, расходом до 200 т/час и температурой 440-500⁰С с определением оптимального варианта конструкции натурального рабочего колеса [5];

- экспериментальное определение на натурной среде оптимального профиля лопатки модели рабочего колеса в оптимальной решётке профилей, определённой на первом этапе;
- экспериментальное определение на натурной среде характеристик и оптимальной геометрии участков подвода и отвода насоса, включая выпрямляющий аппарат.

В НГТУ разработана и используется при экспериментальных исследованиях модельная конструкция осевого электронасоса с поворотными лопатками НСО-02НГТУ (рис. 3). Использование конструкции главного циркуляционного насоса установки БРС-ГПП с поворотными лопатками позволяет:

- перекрывать «обратный» поток теплоносителя при аварийной остановке насоса, заменяя обратный клапан в циркуляционной трассе;
- уменьшать до минимального гидравлическое сопротивление насоса в режиме естественной циркуляции ТЖМТ в реакторном контуре [6].

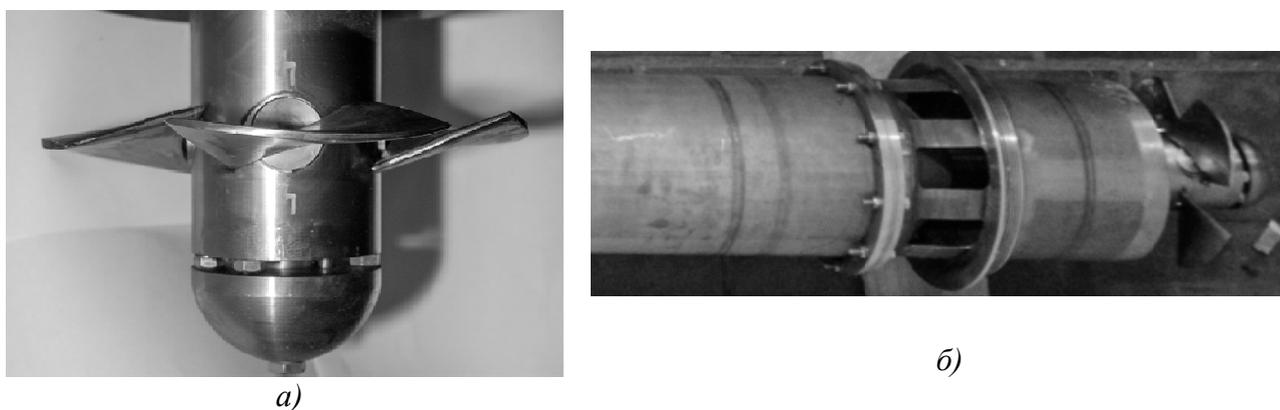


Рис. 3. Фотографии:

а – колеса, установленного на вал; *б* – общего вида насоса с поворотными лопатками

Расхолаживание реактора и обеспечение стояночных режимов реакторной установки

Для обеспечения надежного и безопасного теплоотвода при расхолаживании и в стояночных режимах установки в БРС-ГПП предложено использовать для регулируемого отвода тепла от ТЖМТ воздушно-водяную смесь при давлении, близком к атмосферному с мелкодисперсными каплями воды [7]. Количество отводимого тепла эффективно регулируется изменением массового содержания воды в двухкомпонентном потоке по сигналам от датчиков температуры ТЖМТ на выходе из теплообменника. Отвод тепловыделений в активной зоне может осуществляться подачей воздуха от автономного компрессора и водой, подаваемыми независимо от паротурбинной установки. Характеристики такой системы исследуются и отрабатываются на стендах НГТУ, включая стенд ФТ-4 НГТУ для отвода тепла, вносимого электродвигателем модели насоса БРЕСТ-ОД-300 [8].

В БРС-ГПП рассматривается размещение автономных воздушно-водяных теплообменников в корпусах парогенераторов, либо с использованием поверхностей испарителей в воздушно-водяном режиме.

Особенности работы конструкционных материалов в реакторном контуре БРС-ГПП

В процессе эксплуатации энергетического контура с ТЖМТ работоспособность конструкционных материалов при $T \geq 400-450^{\circ}\text{C}$ может быть обеспечена только при наличии на его поверхности защитных покрытий (оксидного или др.). Последние, в свою очередь, контактируют с потоком ТЖМТ через пристенный слой, обогащённый частицами примесей, физико-химические свойства которого могут существенно отличаться от свойств «чистого» те-

плоносителя без примесей. Характеристики пристенного слоя определяют как процессы массообмена и массопереноса примесей в контуре, так и процессы переноса на локальном рассматриваемом его участке.

Пристенный слой, как показали прямые эксперименты [9], в общем случае, представляет собой дисперсную систему с поверхностными свойствами, в состав которой входят:

- жидкометаллический теплоноситель (жидкая фаза);
- частицы примесей (твёрдая фаза – дебрис, включая оксиды и другие соединения теплоносителя, частицы конструкционных материалов и др.).

Исходя из этого, предполагается осуществлять обоснованный выбор и определять стойкость конструкционных материалов реакторного контура БРС-ГПП с нанесёнными на их поверхности защитными покрытиями, в условиях их контакта, в том числе теплового и гидродинамического, с пристенным слоем и ТЖМТ, моделирующим условия конкретного участка. В настоящее время достаточно представительно обоснована работоспособность ферритно-мартенситных и аустенитных хромо-никелевых сталей применительно к условиям реакторного контура БРС-ГПП при контролируемом содержании активного кислорода 10^{-4} - 10^{-2} , обеспечивающего формирование и доформирование соответствующих защитных оксидных покрытий на поверхностях сталей.

Технология тяжёлых жидкометаллических теплоносителей

В реакторном контуре БРС-ГПП предполагается установка нескольких датчиков контроля термодинамической активности кислорода в ТЖМТ. По соответствующим сигналам от этих датчиков предполагается производить мониторинг состояния контура и работоспособности защитных оксидных покрытий. При поступлении сигнала о снижении содержания кислорода в ТЖМТ ввод газообразного кислорода в объём ТЖМТ предполагается проводить захватом кислородосодержащей газовой фазы струями («брызгами») ТЖМТ на входе в насос. При поступлении сигнала об увеличении содержания кислорода в ТЖМТ этим же устройством производится ввод водородосодержащей газовой смеси в объём ТЖМТ на входе в главный циркуляционный насос. Мелкодисперсная окислительная или восстановительная газовая фаза в составе двухкомпонентного потока после насоса поступает в активную зону и далее в секции парогенератора. Сепарация газовых смесей из ТЖМТ происходит на свободных уровнях в контуре (в парогенераторах, насосах) [3.10]. Такой метод и массообменник исследован и отработан на стендах с ТЖМТ в НГТУ и используется в качестве штатного устройства в установке для испытаний и отработки моделей проточной части насоса установки БРЕСТ-ОД-300 (на стенде ФТ-4 НГТУ) с номинальным расходом до 2000 т/час свинцового теплоносителя.

Выводы

Предложен и экспериментально отрабатываются новые нетрадиционные технические решения мощностного ряда (50-250МВт) реакторных установок малой и средней мощности со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями. Эти решения позволят повысить безопасность энергоблока в случае возникновения потенциально опасной аварии «межконтурная неплотность парогенератора» при любом разумном размере поступления воды, пара в реакторный контур. Обеспечиваются безопасные и эффективные стояночные режимы и охлаждающие установки автономной системой с давлением в системе теплоотвода, близком к атмосферному. Новые решения позволяют повысить экономичность энергоблока за счёт уменьшения массогабаритных характеристик реакторного контура.

Библиографический список

1. Пат. №2320035 РФ Ядерная энергетическая установка, патент №2320035 РФ / Безносков А.В., Молодцов А.А., Бокова Т.А. [и др.]; опубл. 20.03.2008.
2. **Безносков, А.В.** Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтур-

- ную 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. – 2006. – №4. – С. 3–18.
3. Beznosov, A.V. Bokova T.A., Bokov P.A. Technologies and Major Equipment of Circuits Cooled with Pb, Pb-Bi LAP LAMBERT Academic Publishing (2015-01-27)
 4. Пат. №2313143 РФ. Ядерная энергетическая установка / Безносков А.В., Молодцов А.А., Бокова Т.А. [и др.]; опубл. 20.12.2007.
 5. **Безносков, А.В.** Экспериментальные исследования и отработка характеристик насосов на свинцовом теплоносителе ядерных реакторов / А.В. Безносков, А.В. Львов, П.А. Боков [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. РФ. Обнинск. – 2015. – №4. С. 123–133.
 6. Пат. РФ на изобретение RU 161401 U1. Ядерная энергетическая установка / Безносков А. В., Бокова Т.А., Лемехов В. В. [и др.]. Бюл. №11; опуб. 20.04.2014.
 7. Пат. RU24748U1. Ядерная энергетическая установка / Безносков А.В., Бокова Т.А., Пинаев С.С., Назаров А.Д. Бюл. №23 опуб. 20.08.2002.
 8. **Безносков, А.В.** Определение характеристик теплообмена в теплообменниках низкого давления, применительно к контурам, охлаждаемым свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков [и др.] // Атомная энергия. – 2015. – Vol. 118. – №. 5. – Р. 266–271.
 9. **Безносков, А.В.** Триботехнические исследования зон контакта в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей / А.В. Безносков [и др.] // Вестник машиностроения. – М. : Машиностроение. – 2012. – №1. – С. 43–46.
 10. **Безносков, А.В.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н.Новгород, 2012. – 536 с.

*Дата поступления
в редакцию 21.04.2017*

A.V. Beznosov, T. A. Bokova, A.G.Meluzov, P.A.Bokov, N.S.Volkov, A.A. Karbyshev

**THE BASIC TECHNICAL SOLUTIONS OF THE REACTOR
OF BRS-GPG INSTALLATIONS OF SMALL AND MEDIUM POWER
WITH LEAD AND LEAD-VISIBLE HEAT-SUPPLYERS**

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

Purpose: NSTU conducts experimental and theoretical and theoretical studies aimed at justifying the power series (50-250 MW) proposed by the NNGT and the small and medium-sized reactor plants with horizontal steam generators (BRS-GPG).

Design/methodology/approach: To substantiate the concept, the authors were invited to consider: the choice and justification of the coolant, the coolant circulation circuit in the reactor circuit and the reactor block layout, the safety issues of the power unit in the event of a "large steam generator leakage" accident, the steam generator solutions, the technical solutions of the main circulation pump, the reactor cooling Parking modes of the reactor installation, features of the operation of structural materials in the reactor circuit of the BRS-GPG, heavy-liquid technology Cometal coolants.

Findings: New solutions make it possible to increase the profitability of the power unit by reducing the mass-dimensions characteristics of the reactor circuit.

Research limitations/implications: One of the areas providing solutions to the climate conference in Paris - COP21 is the replacement of decommissioned coal plants with small block reactors. This allows us to reduce the cost of the project due to the use of the ready infrastructure. It is possible to use small nuclear power plants in the northern territories, on islands, in isolated power systems, for desalination of water. All this initiates the research and development of new installations with fast neutron reactors cooled by heavy liquid-metal coolants.

Originality/value: The concept of a new reactor unit with a lead coolant, which meets the requirements of safety and economy, was first proposed at the NSTU.

Key words: small and medium power reactor, horizontal steam generator, pump, safety, efficiency, steam generator flow.