

СОСТАВ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕГЛАМЕНТ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ РЕАКТОРНЫХ КОНТУРОВ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Сумин Р.В., Зырянова Т.К., Бокова Т.А., Волков Н.С., Погорелов М.Д.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24



Приводится анализ систем поставки и транспортировки свинца на блок АЭС, первоначально заполненный теплоносителем реакторных контуров со свинцовым теплоносителем. Постулируются основные требования к системе заполнения свинцом реакторов типа БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200. Для заполнения свинцом первого контура реактора БРЕСТ-ОД-300 оптимальным с точки зрения времени заполнения, количества необходимого оборудования, обеспечения технологии теплоносителя вариантом следует считать поставку и транспортировку свинца от завода-изготовителя в виде чушек с обеспечением механизации операции по транспортировке чушек от участка завода-поставщика до горловины плавильного бака системы приготовления и заполнения свинцом. Для серийных блоков на базе РУ БР-1200 оптимальной будет поставка свинца требуемого качества, обеспечиваемого заводом-изготовителем, в специальных вагонах-цистернах, в которых предусмотрена система нагрева.

Система заполнения свинцом, принятая в проекте строящегося реактора БРЕСТ-ОД-300, обеспечивает выполнение основных операций на самом энергоблоке: подготовку свинца к загрузке в систему, загрузку в емкость плавления, нагрев, плавление и догрев свинца до температуры заполнения, подготовку свинца к заполнению контура, заполнение реакторного контура. Для поддержания технологии свинцового теплоносителя системы заполнения первого контура предусматриваются операции очистки свинца методом отстоя и очистки свободной поверхности свинца от шлаков. Также предусмотрена циркуляция свинца перед его подачей в реакторный контур через специальные фильтрующие материалы.

Для серийных энергоблоков на базе РУ БР-1200, имеющих статус коммерческих, предлагается все оборудование и технологические операции для поставки свинца требуемого качества, используемые многократно, размещать и проводить на заводе-изготовителе свинца, не обременяя этими задачами серийные энергоблоки.

Результаты проведенных исследований предлагаются к использованию при разработке проектной документации для реакторных установок БРЕСТ-Д-300 и БР-1200 со свинцовым теплоносителем, а также обслуживающих их систем.

Ключевые слова: свинцовый теплоноситель, реактор на быстрых нейтронах, транспортировка, система заполнения первого контура.

Для цитирования: Сумин Р.В., Зырянова Т.К., Бокова Т.А., Волков Н.С., Погорелов М.Д. Состав, технические характеристики и регламент применения устройств для заполнения реакторных контуров со свинцовым теплоносителем. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 4. – С. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.08>

ВВЕДЕНИЕ

В проектном направлении «Прорыв» [1] создается опытно-демонстрационный энергетический комплекс, состоящий из реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, модуля переработки отработавшего ядерного топлива и обращения с РАО, модуля рефабрикации топлива, а также разрабатывается коммерческий энергоблок на базе РУ со свинцовым теплоносителем БР-1200. Одной из важных технологических операций перед вводом энергоблока в работу является первичное заполнение контура.

Для успешного создания системы заполнения первого контура реактора БР-1200 необходимо провести анализ имеющихся технических решений и регламентов. В отечественной практике имеется опыт создания систем заполнения свинцово-висмутовым теплоносителем контуров реакторных установок АПЛ, а также натрием контуров реакторов типа БН, однако он не полностью применим для свинцового теплоносителя.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ СПОСОБОВ ПОСТАВКИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ СВИНЦА ОТ ЗАВОДА-ПОСТАВЩИКА

Согласно отечественным техническим условиям на поставку свинца, его поставка предусматривается в следующем виде: чушками массой 30–40 кг, которые транспортируются без упаковки; отливками 1, 2 и 3 тонны, а также в виде гранул.

Очевидно, что объем заказа на поставку свинца в количестве, необходимом для заполнения реакторного контура такой установки как БР-1200 – 18900 т [2], размещаемый на одном или нескольких заводах-поставщиках, позволяет потребовать от поставщика любую форму поставки и применения технологического процесса, обеспечивающего необходимое качество теплоносителя по содержанию примесей. При этом, как и в других случаях, необходимо удовлетворение двум основополагающим критериям: экономичности и безопасности ядерного источника энергии.

Транспортировка чушками

Технологический процесс с получением конечной продукции в виде чушек свинца промышленностью освоен. При поставке свинца в виде чушек могут быть механизированы операции подачи (транспортировки) чушек в железнодорожные вагоны. При использовании соответствующих приспособлений могут быть механизированы операции по размещению чушек в вагоне и разгрузке чушек из вагонов с подачей их в приемные горловины

плавильных баков системы приема и накопления свинца (для РУ БРЕСТ-ОД-300). Необходимость механизации и обеспечения высокоскоростных процессов загрузки-выгрузки диктуется значительным количеством чушек. Принимая в БРЕСТ-ОД-300 объем свинца 900 м³ [2], ориентировочную массу одной чушки 35 кг, плотность свинца около 10,5 т/м³, получаем общее количество чушек $900 \cdot 10,5 \cdot 10^3 / 35 = 2,7 \cdot 10^5$ шт. При грузоподъемности закрытого вагона по свинцу около 120 т получаем, что в вагон может быть загружено около 3429 чушек, и число используемых вагонов – 79 шт.

При транспортировке свинца чушками возможны варианты поставки с герметичной упаковкой каждой чушки на заводе-поставщике, исключающей окисление поверхности чушки в процессе транспортировки, а также транспортировка чушек в таре без принятия мер, исключающих контакт поверхности чушки с кислородом воздуха.

Очевидно, что герметизация и последующее удаление упаковки значительно удорожают поставляемый свинец, усложняют технологические процессы с обеспечением механизации герметизации и удаления упаковки, увеличивают время транспортировки чушек. Создаются предпосылки для случайного загрязнения теплоносителя материалом упаковки, на блоке АЭС требуется создание специального участка снятия упаковки в атмосфере инертного газа и последующей транспортировки чушек в этой же атмосфере. Единственным преимуществом поставки чушек в герметичной упаковке является уменьшение содержания примеси кислорода в свинце. При применении схемы приготовления и накопления теплоносителя в специальных электрообогреваемых емкостях содержание кислорода в чушках или на их поверхности существенного значения не имеет. Процесс накопления теплоносителя на блоке АЭС длится несколько месяцев, и в плавильных емкостях всегда будет происходить очистка свинца от примеси кислорода отстоем – до концентрации насыщения при температуре отстоя. При необходимости в этих же емкостях может быть произведена очистка от шлаков – оксидов свинца на его поверхности подачей водорода в плавильный бак, проведение операций по доведению содержания кислорода в свинце первоначального заполнения до любой разумной величины достаточно просто и недорого (требуется лишь подача водорода (от баллонов) в газовый объем плавильных баков или на барботаж через слой свинца). При этом водород должен быть в смеси с аргоном при взрывобезопасной концентрации.

Исходя из изложенного, а также из экономических соображений и необходимости сокращения времени накопления свинца на блоке АЭС, целесообразно рекомендовать поставку чушек свинца без герметичной упаковки. Транспортная тара должна обеспечивать полную механизацию процессов транспортировки чушек от соответствующего участка завода-поставщика до закрытого железнодорожного вагона, включая размещение в нем чушек, а также полную механизацию процессов на блоке АЭС – от разгрузки вагонов до загрузки чушек в горловину плавильных баков. При этом накопление свинца на блоке АЭС может быть совмещено с разогревом первого контура, занимающего около девяти месяцев.

Транспортировка гранулами

Поставка свинца в виде гранул – частиц, по форме близких к эллипсоиду или, точнее, к телу, образованному двумя коноидами вращения с общим основанием, с минимальным поперечным диаметром около 5 мм и максимальным продольным размером около 10 мм, – освоена промышленностью и характерна для химически более чистого (по примесям) свинца, расфасованного в стеклянные банки с крышкой объемом 0,2–0,5 дм³. Поставка в виде гранул имеет большую поверхность свинца, контактирующего с воздухом и, соответственно, общая масса свинца будет иметь большее содержание примеси кислорода,

чем свинца, поставляемого в чушках (при прочих равных условиях). С точки зрения транспортировки поставка свинца для реактора БРЕСТ-ОД-300 в виде гранул по сравнению с поставкой чушками может иметь следующие преимущества:

- при применении специальных железнодорожных вагонов с бункерами для загрузки-выгрузки свинца операции загрузки-выгрузки свинца из вагона проще механизировать;
- подача свинца в виде гранул через горловину плавильных баков, вероятно, не потребует введения демпфирующих элементов в конструкцию баков, тогда как для чушек большой массы такие элементы могут оказаться необходимыми;
- время нагрева для плавления гранул в емкости плавления при прочих равных условиях меньше, чем время плавления чушек такой же массы вследствие более развитой поверхности теплообмена.

В целом, учитывая более сложный технологический процесс изготовления гранул, целесообразность их поставки только в комплекте со специальными железнодорожными вагонами с бункерами, большее содержание примеси кислорода, можно считать, что поставка свинца гранулами для заполнения реактора БРЕСТ-ОД-300 нецелесообразна.

Транспортировка в вагонах-цистернах

Поставка свинца на АЭС однозначно потребует разработки и изготовления обогреваемых железнодорожных вагонов-цистерн, по конструкции аналогичных вагонам-цистернам для перевозки натрия первого и второго контуров III блока БАЭС [4]. Очевидно, что полезный объем цистерны для свинца должен соответствовать допустимой грузоподъемности, ограниченной величиной предельной нагрузки на железнодорожные пути. Для натрия такой объем составлял около 35 м³. Для транспортировки свинца на серийную РУ БР-1200 применять такие емкости невозможно из-за слишком большого веса (около 400 т). Требуется разработка вагонов-цистерн с меньшим объемом. Принимая грузоподъемность вагона-цистерны по свинцу около 120 т, полезный объем по свинцу составит около 12 м³. При этом необходимо предусмотреть свободный объем в верхней части цистерны для создания защитной газовой полости и обеспечения свободного пространства, необходимого для компенсации изменения объема при плавлении свинца.

Количество используемых вагонов-цистерн оценивается аналогично транспортировке чушками и принимается равным 79 шт. Требуемое количество вагонов-цистерн может быть значительно снижено при организации загрузки свинца в первый контур «с колес».

С точки зрения механизации операции транспортировки и загрузки-выгрузки свинца, безусловно, поставка свинца в вагонах-цистернах является оптимальной. С точки зрения обеспечения нормируемого состава свинца по примесям применение вагонов-цистерн также является оптимальным, так как транспортировка застывшего свинца с поддержанием избыточного давления защитного газа над свободным уровнем исключает изменение примесного состава теплоносителя. Единственным, но существенным недостатком такого способа поставки является необходимость проектирования и изготовления соответствующих железнодорожных вагонов-цистерн. При достаточно широком строительстве серийных блоков со свинцовым теплоносителем создание транспортных вагонов-цистерн для перевозки свинца является, безусловно, оправданным.

Проведенный анализ показывает следующее.

1. Наиболее предпочтительными для заполнения свинцом первого контура реактора БРЕСТ-ОД-300 следует считать поставку и транспортировку свинца от завода-изготовителя чушками с обеспечением механизации операций по транспортировке чушек до горловины плавильного бака системы приготовления и заполнения свинцом.

2. При наличии программы строительства последующих блоков АЭС на базе РУ БР-1200 может оказаться экономически оправданной оптимальная с технико-экономической точки зрения поставка свинца в вагонах-цистернах с возможностью многократного использования после заполнения реакторного контура блока.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ЗАПОЛНЕНИЯ СВИНЦОМ

Способ поставки и транспортировки свинца от завода-поставщика, метод загрузки теплоносителя в реакторный контур, схемные и конструктивные решения системы приема, накопления, подготовки к загрузке и загрузки реакторного контура блока многовариантны и могут существенно различаться.

Реактор БРЕСТ-ОД-300

Система заполнения свинцом реактора БРЕСТ-ОД-300 должна обеспечивать выполнение следующих основных операций:

- подготовку свинца к загрузке в систему;
- загрузку в емкость плавления;
- нагрев, плавление и догрев свинца до температуры заполнения;
- подготовку свинца к заполнению контура;
- заполнение реакторного контура.

При проведении части этих операций возможно использование оборудования и средств транспортировки свинца, например, транспортных вагонов-цистерн.

Подготовка свинца к загрузке в систему

Операции подготовки свинцовых чушек к загрузке в систему в общем случае должны включать в себя доставку транспортного средства на места разгрузки и, в зависимости от способа транспортировки:

- монтаж транспортера или другого устройства подачи свинца из вагона в загрузочный люк плавильного бака;
- установку или размещение устройства подачи свинца из вагона на транспортер;
- обеспечение контролируемого нагрева плавильного бака с помощью автоматизированной системы управления нагревом током, работающей по уставкам термпар;
- обеспечение приема свинца в плавильный бак (поддержание защитной атмосферы в газовом объеме бака; установку, при необходимости, лотков, демпфирующих устройств или др., организацию отсоса паров свинца и т.д.).

В том случае, если чушки свинца поставлялись в герметичной упаковке, осуществляется ее удаление.

Загрузка в емкость плавления

В общем случае, емкостью плавления может являться специальный бак системы заполнения, в который загружается свинец.

Загрузка в емкость плавления в общем случае включает в себя следующие операции:

- механизированную подачу чушек на транспортер или другое транспортирующее средство;
- транспортировку свинца от вагона до люка емкости плавления;
- подачу свинца с транспортера через приемный люк емкости плавления в ее нагреваемый объем.

При выполнении последней операции необходимо соблюдение следующей последовательности: загрузка чушками плавильной емкости, герметизация, вакуумирование, заполнение аргоном реакторной чистоты

Нагрев, плавление и догрев свинца до температуры заполнения

В общем случае операции нагрева и плавления свинца в баках системы заполнения свинцом должны выполняться один раз – в процессе накопления свинца в системе с возможным последующим замораживанием и второй раз – при подготовке к заполнению реакторного контура. Возможно совмещение этих операций. Принятые при расчетных оценках допущения могут привести к занижению значения времени плавления чушек; корректный расчет значения этой величины невозможен без знания конструкций емкости плавления, мощности ее электронагревателей, расчета тепловых потерь и др.

Очевидно, что время загрузки чушек в плавильный бак может быть существенно меньше, чем время нагрева и плавления чушек. В общем случае время нагрева и плавления полностью загруженной емкости плавления определяется следующими основными факторами:

- массой загружаемых чушек;
- допустимой температурой стенки емкости при внешнем электрообогревателе или температурой электронагревателей (тэнов), располагаемых внутри емкости (тепло, передаваемое от стенок к свинцу на различных участках поверхности теплообмена); в начальный момент разогрева значительная часть тепла будет передаваться от стенки к чушкам не через слой расплавленного свинца, а через газовый объем (с существенно меньшим значением коэффициента теплопередачи); по мере плавления количество тепла, передаваемое свинцу через газ, будет уменьшаться;
- мощностью электронагревателей, величиной тепловых потерь в окружающую среду и затратами тепла на нагрев металлоконструкций емкости плавления;
- конкретной конструкцией емкости плавления и геометрией поверхностей контактов чушек между собой, со стенками и с расплавленным свинцом, определяющими условия нестационарного теплообмена между нагретыми стенками емкости и массой свинца.

Подготовка свинца к заполнению контура

При проведении операций накопления свинца в плавильном баке или в других емкостях специальной системы заполнения реакторного контура свинцом естественным образом реализуется операция очистки теплоносителя методом отстоя. При этом максимальное содержание примеси кислорода в свинце не будет превышать значение концентрации насыщения при температуре в емкости в момент подачи свинца в реакторный контур [5]. Содержание остальных примесей будет соответствовать содержанию примесей в свинце, отпускаемым заводом-поставщиком. На свободной поверхности теплоносителя в емкостях системы заполнения реакторного контура будут концентрироваться шлаки – оксиды свинца, пропитанные свинцом, всплывающие в процессе отстоя. Технология передачи свинца из плавильного бака в первый контур должна исключать захват шлаков со свободного уровня. Также с целью более полного использования свинца, исключения забивания трубопроводов шлаками, исключения заброса шлаков в реакторный контур при неправильных действиях персонала целесообразна очистка свободной поверхности свинца путем подачи в газовый объем емкостей водорода (для обеспечения взрывобезопасности водород должен подаваться в определенной концентрации в аргоне).

Принципиально возможна доочистка свинца в емкостях системы заполнения от других примесей, например, организацией циркуляции свинца перед его подачей в реакторный контур через специальные фильтры, как это делается на блоках АЭС с натриевым теплоносителем или другими методами. Такие операции будут целесообразны в случае недопустимого превышения содержания каких-либо примесей в накопленном свинце вследствие случайных или других загрязнений.

Реактор БР-1200

При разработке требований к системе заполнения свинцом первого контура реактора БР-1200, имеющего статус коммерческого, предполагалось, что поставка свинца на энергоблок осуществляется в вагонах-цистернах емкостью по свинцу около 10 м³, имеющих систему электрообогрева, исходя из максимальной грузоподъемности вагона 120 т, и уровнемеры или сигнализаторы верхнего и нижнего уровней. При этом требуемое качество свинца по примесям обеспечивается и гарантируется заводом-изготовителем свинца, на котором должны быть предусмотрены соответствующее оборудование, которое используется многократно, и проведение необходимых технологических операций. Это позволяет исключить соответствующие технологические операции и оборудование на серийных энергоблоках, что улучшает их технико-экономические показатели.

При поставке свинца в вагонах-цистернах требуемый примесный состав должен быть обеспечен и должен проконтролироваться входным пробоотбором.

Основной задачей при рекомендуемом способе заполнения первого контура является исключение попадания воздуха при передаче свинца из вагона-цистерны в разогретый до температуры около 400°С первый контур, заполненный аргоном высокой чистоты. С этой целью должны быть разработаны и изготовлены съемные трубопроводы, оснащенные системой обогрева, с быстроразъемными герметичными соединениями с выходным патрубком вагона-цистерны и входным патрубком приемного трубопровода первого контура и системой вакуумирования и заполнения аргоном с контролем содержания кислорода, а также соответствующими заглушками, соединяемыми и разъединяемыми дистанционно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для заполнения свинцом первого контура реактора БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем оптимальным вариантом следует считать поставку и транспортировку свинца от завода-изготовителя чушками с обеспечением механизации операции по транспортировке чушек от транспортного средства, осуществляющего доставку чушек, до горловины плавильного бака системы приготовления и заполнения свинцом.

Для серийных блоков на базе РУ БР-1200 оптимальной будет поставка свинца в вагонах-цистернах. Система заполнения свинцом реактора БР-1200 должна обеспечивать выполнение следующих основных операций: разогрев свинца в вагоне-цистерне до температуры плавления и его догрев до температуры заполнения, дистанционное герметичное соединение съемного трубопровода с выходным патрубком вагона-цистерны и входным патрубком трубопровода системы заполнения первого контура, разогрев съемного трубопровода до температуры заполнения, вакуумирование съемного трубопровода, заполнение трубопровода аргоном с контролем загрязнения кислородом, открытие арматуры на выходном патрубке вагона-цистерны и входном трубопроводе заполнения, опорожнение вагона цистерны в первый контур, закрытие соответствующей арматуры, отключение обогрева вагона-цистерны и съемного трубопровода, демонтаж съемного трубопровода, замена порожнего вагона-цистерны на заполненный, после чего операции повторяются до полного заполнения первого контура.

Финансирование

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

Литература

1. Adamov E.O., Kaplienko A.V., Orlov V.V., Smirnov V.S., Lopatkin A.V., Lemekhov V.V., Moiseev A.V. Brest Lead-Cooled Fast Reactor: From Concept to Technological Implementation. // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 129. – Issue 4. – PP. 179–187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00731-w>
2. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами (под общ. ред. проф. Е.О. Адамова). – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – 502 с. ISBN 978-5-98706-129-9.
3. Усынин Г.Б., Кусмарцев Е.В. Реакторы на быстрых нейтронах: Учебное пособие для вузов / Под редакцией Ф.М. Митенкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/usynin_reaktory-na-bystryh-neytronah_1985/p0/ (дата доступа 23.05.2024).
4. Легких А.Ю., Скоморохов А.Н., Садовничий Р.П. Неопределенность растворимости кислорода в жидком свинце. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – № 3. – С. 252–260. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-3-252-260

Поступила в редакцию 23.05.2024

Авторы

Сумин Роман Викторович, ассистент,

E-mail: rom.sumin@yandex.ru

Зырянова Татьяна Константиновна, ассистент,

E-mail: ats@nntu.ru

Бокова Татьяна Александровна, доцент, к.т.н.,

E-mail: tatabo@bk.ru

Волков Никита Сергеевич, младший научный сотрудник,

E-mail: M16-TS@ya.ru

Погорелов Михаил Дмитриевич, ассистент,

E-mail: md.pogorelov@yandex.ru

UDC 621.039.4

Composition, Performance and Regulations for Application of Devices to Fill Reactor Circuits with Lead Coolant

Sumin R.V., Zyryanova T.K., Bokova T.A., Volkov N.S., Pogorelov M.D.

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,
24 Minina St., 603155 Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract

This paper is devoted to analyzing systems for delivery and transportation of lead to the NPP unit, and for initial filling of reactor circuits with lead coolant. Key requirements are postulated for the lead filling system for the BREST-OD-300 and BR-1200 reactors. The analysis results make

it possible to conclude that the best possible option for filling the reactor primary circuit with lead (in terms of filling time, quantity of required equipment, and availability of coolant technology) will be delivery and transportation of lead from the manufacturer site in the form of ingots with mechanizing the operation for transportation of ingots from the supplier site to the lead preparation and filling system smelter inlet. For serial units based on the BR-1200 reactor plant, the best possible option will be delivery of lead in special tank cars provided with a heating system.

The lead filling system adopted for the design of the BREST-OD-300 reactor under construction allows the following basic operations: preparation of lead for the loading into the system, loading of lead into the smelter, heating, melting and afterheating of lead to the filling temperature, preparation of lead for the circuit filling, reactor circuit filling. To support the primary circuit filling system lead coolant technology, operations will be performed for cleaning lead by settling method and for cleaning the free surface of lead from slags. Lead will be also circulated prior to being fed into the reactor circuit through special filter materials.

The results of the study are proposed for use in developing design documentation for the BREST-OD-300 and BR-1200 lead cooled reactor plants, as well as for their supporting systems

Keywords: lead coolant, fast neutron reactor, transportation, primary circuit filling system.

For citation: Sumin R.V., Zyryanova T.K., Bokova T.A., Volkov N.S., Pogorelov M.D. Composition, Performance and Regulations for Application of Devices to Fill Reactor Circuits with Lead Coolant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 4, pp. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.08> (in Russian).

References

1. Adamov E.O., Kaplienko A.V., Orlov V.V., Smirnov V.S., Lopatkin A.V., Lemekhov V.V., Moiseev A.V. Brest Lead-Cooled Fast Reactor: From Concept to Technological Implementation. *Atomic Energy*, 2021, vol. 129, iss. 4, pp. 179–187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00731-w>
2. *Handbook of Russian Nuclear Power. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors* (under the general editorship of prof. E.O. Adamov). Moscow, NIKIET Publ., 2020, 502 p. ISBN 978-5-98706-129-9 (in Russian).
3. Usynin G.B., Kusmartsev E.V. *Fast neutron reactors: A textbook for universities* (Ed. F.M. Mitenkov). Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 288 p. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/usynin_reaktory-na-bystryh-neytronah_1985/p0/ (accessed May 23, 2024) (in Russian).
4. Legkih A.Yu., Skomorokhov A.N., Sadovnichy R.P. Uncertainty of Oxygen Solubility in the Liquid Lead. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2019, no. 3, pp. 252–260. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-3-252-260 (in Russian).

Authors

Roman V. Sumin, Assistant,

E-mail: rom.sumin@yandex.ru

Tatyana K. Zyryanova, Assistant,

E-mail: ats@nntu.ru

Tatyana A. Bokova, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: tatabo@bk.ru

Nikita S. Volkov, Junior Researcher,

E-mail: M16-TS@ya.ru

Mikhail D. Pogorelov, Assistant,

E-mail: md.pogorelov@yandex.ru