

СТАТЬИ

УДК 621.039

БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ СО СВИНЦОВО-ВИСМУТОВЫМ И СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

*Троянов В.М., Гулевич А.В. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ, г. Обнинск),
Тошинский Г.И. (АО «АКМЭ-инжиниринг», г. Москва, АО «ГНЦ РФ — ФЭИ, г. Обнинск),
Петроченко В.В., Комлев О.Г., Кондауров А.В. (АО «АКМЭ-инжиниринг», г. Москва)
e-mail: toshinsky@ippe.ru*

На протяжении короткого в историческом масштабе периода развития ядерной энергетики в разных странах на АЭС с реакторами различного типа произошли маловероятные аварии разной степени тяжести, сопровождавшиеся значительным выбросом радионуклидов в окружающую среду и/или большим экономическим ущербом. Среди них — авария на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США) с PWR в 1979 г., на Чернобыльской АЭС с РБМК в 1986 г., АЭС «Фукусима-1» (Япония) с BWR в 2011 г. Аварии привели к утрате доверия к ядерной энергетике и снижению темпов ее развития, в некоторых странах и к свертыванию. Одним из путей восстановления доверия населения к ядерной энергетике является создание реакторов с высоким уровнем внутренней самозащищенности и пассивной безопасности, к которым относятся быстрые реакторы с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями: эвтектическим свинцово-висмутовым сплавом и свинцом. В таких реакторах отсутствуют аккумулированная в теплоносителе потенциальная энергия сжатия и химическая энергия, способные при определенном маловероятном сочетании исходных событий вызвать выброс радионуклидов, требующий эвакуации населения. Поэтому в них не требуются многие системы безопасности, которые необходимы для снижения вероятности и тяжести последствий аварий, связанных с высоким давлением и выделением водорода. В связи с этим АЭС с такими реакторами могут оказаться также более дешевыми и конкурентоспособными.

Кроме указанных общих свойств, тяжелые жидкометаллические теплоносители обладают и свойствами, по-разному влияющими на характеристики реакторных установок. В статье приведен анализ таких свойств и оценено их влияние на характеристики реакторных установок со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями.

Температура плавления. Свинцово-висмутовый теплоноситель имеет значительно более низкую температуру плавления 124 °С по сравнению со свинцовым 327 °С. Это приводит к следующим отличиям характеристик реакторных установок:

значительное расширение эксплуатационного температурного диапазона. Поскольку температура обоих теплоносителей на выходе из активной зоны должна быть ограничена одним и тем же значением 500—550 °С, определяемым коррозионной стойкостью материала оболочки твэла при одинаковой максимальной температуре с учетом факторов перегрева, температура свинцового теплоносителя на входе в активную зону, т.е. на выходе из парогенератора должна быть существенно выше для исключения его замораживания в парогенераторе. Снижение температуры свинцово-висмутового теплоносителя на выходе из парогенератора позволяет при использовании пароводяного термодинамического цикла не повышать для исключения его замораживания давление пара и температуру питательной воды. В то же время для повышения температуры свинцового теплоносителя на входе в активную зону необходимо снижение

его подогрева в активной зоне при одинаковой мощности, что может быть достигнуто только за счет повышения расхода. При соответствующем повышении скорости это приведет к росту мощности насосов в кубической зависимости от расхода. Для жидкометаллических теплоносителей, плотность которых более чем в 10 раз выше, чем воды, это увеличивает стоимость насосов, а также повышает расход энергии на собственные нужды. При сохранении одинаковой скорости теплоносителей это увеличит площадь проходного сечения в активной зоне, что может быть достигнуто повышением ее диаметра или уменьшением объемной доли топлива при росте шага твэлов. В последнем случае потребуется повышенное содержание в топливе делящегося изотопа, что также увеличивает стоимость. Кроме того, при увеличении шага твэлов усложняется их дистанционирование — требуются дистанционирующие решетки вместо спиральных ребер, как для реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем;

возможность увеличения в реакторах со свинцово-висмутовым теплоносителем температурного запаса по коррозионной стойкости и длительной прочности ферритно-мартенситной стали — материала оболочек твэлов для повышения надежности путем снижения температуры теплоносителя на выходе из активной зоны. Для свинцового теплоносителя эта возможность ограничена из-за необходимости иметь как можно более высокую температуру на выходе из активной зоны вследствие вынужденного повышения температуры на входе. Уменьшение температуры свинцово-висмутового теплоносителя на входе и выходе из активной зоны приводит к снижению к.п.д. Значимость его влияния может быть определена только на основании проектных проработок. Хотя физико-химические основы технологии теплоносителей идентичны, более высокая максимальная температура оболочек твэлов в неизотермическом свинцовом контуре затрудняет поддержание в стабильном состоянии защитного оксидного покрытия Fe_3O_4 оболочек твэлов. Это связано с повышением давления диссоциации оксида железа и затрудненным доступом растворенного кислорода к местам касания пучков дистанционирующих решеток ТВС с гладкими трубками оболочек твэлов и ячеек дистанционирующих

решеток между собой в области наиболее высокой температуры;

более высокая температура плавления свинцового теплоносителя, повышающая вероятность его замораживания в парогенераторе при нарушении нормальной эксплуатации и требующая при нормальной работе увеличения давления пара и соответственно температуры кипения воды, а также температуры питательной воды, подаваемой в парогенератор. Это приводит к необходимости введения в тепловую схему второго контура дополнительного подогревателя питательной воды. Все это удорожает и усложняет АЭС, увеличивает долю затрат на собственные нужды (мощность питательных насосов) при незначительном росте к.п.д. термодинамического цикла. Количественное влияние этого фактора на технико-экономические характеристики с учетом увеличения к.п.д. при повышении параметров пара может быть определено только при сравнительных проектных проработках;

затрудненное использование парогенератора для расхолаживания реакторов со свинцовым теплоносителем. Одним из возможных технических решений является применение теплотехнически малоэффективных воздушных теплообменников в первом контуре, снижающих вместе с тем вероятность замораживания теплоносителя за счет низкой теплоотдачи к воздуху;

возможное полностью пассивное расхолаживание реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем малой мощности с отводом остаточного энерговыделения через корпус, воздушный зазор и страховочный кожух непосредственно в водяной бак, в который погружен реактор. Воздушный зазор создает теплоизоляционный барьер, препятствующий замораживанию теплоносителя в течение значительно более длительного времени, чем для реакторов со свинцовым теплоносителем, когда требуется включение системы обогрева. Для свинцового теплоносителя реализация такой возможности требует более сложных решений;

необходимость поддержания температуры свинцового теплоносителя в стояночных режимах на уровне не ниже 370°C , требующая повышения мощности системы обогрева, затрудняющая ремонтные работы, замену оборудования и обслуживание без применения дистанционного оборудования. В то же время при

его более высокой температуре на входе в активную зону значительно снижается радиационное охрупчивание ферритно-мартенситной стали. Для свинцово-висмутовых реакторов с более низкой температурой на входе в активную зону для восстановления пластичности стали может быть рекомендован кратковременный периодический отжиг радиационных дефектов при $\sim 500^\circ\text{C}$.

Изменение объема при плавлении. Эксплуатация атомных подводных лодок показала, что нельзя исключить несанкционированное замораживание свинцово-висмутового теплоносителя. Это вызывает необходимость безопасного для сохранения работоспособности оборудования режима его размораживания [1].

По данным [2] объем свинцово-висмутового эвтектического сплава при плавлении не изменяется. Именно это сохранило работоспособность оборудования после размораживания, в том числе и всего первого контура реактора первой опытной подводной лодки К-27 проекта 645 после нескольких лет выдержки в замороженном состоянии. Этому также способствовал сравнительно небольшой интервал температуры от 20°C до температуры плавления $123,5^\circ\text{C}$ при разогреве реактора, когда механические напряжения в оборудовании возникают за счет разности коэффициентов термического расширения теплоносителя и стали. Следует отметить еще одно свойство — медленное самопроизвольное достигающее около 1% за два месяца увеличение объема в твердом состоянии, обусловленное изменением кристаллической структуры [1]. В экспериментах наблюдалась его медленная самоэкструзия из замкнутого объема через небольшое отверстие. Однако низкая твердость и высокая пластичность в твердом состоянии исключили повреждение оборудования.

В то же время объем свинца при плавлении увеличивается на 3,7% [2]. Интервал изменения температуры при разогреве от 20°C до температуры плавления 327°C значительно выше. Эти факторы необходимо принимать во внимание при размораживании, так как усадочные раковины, образующиеся при переходе свинца из жидкого в твердое состояние, будут образовываться в одних местах первого контура, а объем при плавлении может увеличиваться в других при неверно выбранной методике разогрева.

Образование ^{210}Po . По этому показателю свинцово-висмутовый теплоноситель значительно проигрывает свинцовому — его скорость образования в 10^4 раз больше. Радиологическая опасность ^{210}Po проявляется при попадании теплоносителя или контактирующего с ним газа в обслуживаемые помещения, что имело место при авариях и ремонте реакторных установок атомных подводных лодок и наземных стендов-прототипов в период их освоения. Опыт эксплуатации показал, что выход аэрозолей ^{210}Po и радиоактивность воздуха в соответствии с законами термодинамики резко уменьшаются после снижения температуры и затвердевания пролитого сплава. Быстрое затвердевание пролитого теплоносителя ограничивает площадь радиоактивного загрязнения и позволяет его удалять в виде твердых радиоактивных отходов. Низкая концентрация полония на уровне $10^{-4}\%$ и образование термодинамически стойкого химического соединения полония со свинцом обуславливают низкую концентрацию ^{210}Po в воздухе при аварийной разгерметизации первого контура.

Для ремонтно-восстановительных работ на загрязненном оборудовании, удаления вытекшего теплоносителя (на стенде 27/ВТ до 20 т) были разработаны меры индивидуальной и коллективной защиты персонала (респираторы, защитная одежда, организация вентиляции), методы дезактивации оборудования и фиксации активности на поверхностях, приемы ремонтно-восстановительных работ, снижающие риск попадания опасного количества ^{210}Po внутрь организма и на кожные покровы.

Персонал, участвовавший в работах, в том числе и после удаления теплоносителя из трубок парогенератора (несанкционированный залив более 100 трубок через одну трубку, потерявшую герметичность, на подводной лодке К-64), подвергался периодическому медицинскому обследованию. На основе многочисленных радиометрических анализов биопроб персонала было установлено отсутствие инкорпорированного полония в организме выше допустимых пределов [3]. Это подтверждает высокую эффективность применявшихся средств индивидуальной и коллективной защиты, правильность выбора технологии и организации ремонтно-восстановительных работ.

Отсутствию тяжелых радиационных последствий также способствовали сравнительно быстрое выведение полония из организма в результате обменных процессов (эффективный период полувыведения составляет около 30 сут) и низкое содержание полония, соответственно уменьшающее его летучесть в сравнении с чистым полонием. Тем более это справедливо для реакторной установки интегральной конструкции с защитным кожухом, что исключает возможность течей.

В одной из работ, опубликованных в США [4], приводятся данные ретроспективного анализа смертности среди персонала, занятого на работах с выделенным из облученного висмута ^{210}Po в 1944—1972 гг. и контролируемого по внутреннему облучению. Были проанализированы медицинские протоколы биоанализов (свыше 160 тыс. биопроб) белых мужчин в количестве 4402 чел. (104 326 чел.-лет), работавших в этот период с ^{210}Po . Результаты наблюдений были сопоставлены с официальными данными о причине смерти 987 чел. из этой группы за период по январь 1984 г. Также была сравнена статистика смертности этой группы с аналогичными данными двух контрольных групп лиц (средней по США и штату Огайо) и сделан вывод об отсутствии связи между дозой облучения за счет инкорпорированного полония до 1 Зв и уровнем смертности по причине злокачественных образований. Фактически смертность от разных раковых заболеваний в изучавшейся когорте работников была даже меньше, чем в двух контрольных группах.

Американские и японские специалисты, проанализировав опыт, также пришли к выводу, что образование полония не является препятствием для использования свинцово-висмутового теплоносителя в ядерной энергетике [5, 6]. Об этом также свидетельствуют исследования, направленные на создание быстрых реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем в разных странах — СББР-100, MYRRHA (Бельгия), CLEAR (КНР) и др.

Следует отметить, что повышенная скорость образования ^{210}Po в быстром реакторе со свинцово-висмутовым теплоносителем полностью нивелируется при использовании тяжелых жидкометаллических теплоносителей в качестве жидких мишеней подкритических трансмутационных систем, управляемых ускорителем (ADS).

В таких системах под воздействием протонов высокой энергии ускорителя протекают прямые каскадные реакции скалывания, в результате чего образуются в большом количестве радионуклиды, более опасные в сравнении с ^{210}Po . Поэтому перенос результата расчета скорости образования ^{210}Po в мишени ADS на быстрый реактор со свинцово-висмутовым теплоносителем, как это сделано в работе [7], неправомерен.

Необходимо также отметить, что при облучении нейтронами висмута образуется долгоживущий изотоп $^{210\text{m}}\text{Bi}$ с периодом полураспада около 3 млн лет, активность которого достигает через 1000 лет облучения на полной мощности радиоактивности природного урана. Эту долгоживущую радиоактивность следует учитывать при окончательном захоронении свинцово-висмутового теплоносителя в виде твердых радиоактивных отходов. Аналогичная ситуация возникает при утилизации циркония легководных реакторов, в котором при облучении нейтронами накапливается долгоживущий ^{93}Zr с периодом полураспада 1,6 млн лет.

Ресурсы, производство, цена свинца и висмута. По этим характеристикам свинцово-висмутовый теплоноситель также уступает свинцовому. Свинец более широко распространен в природе, его разведанные ресурсы и производство не ограничивают применение в ядерной энергетике, например, в реакторах типа БРЕСТ, цена свинца ниже цены висмута. Выполненные АО «Атомредметзолото» и АО «ВНИИПромтехнологии» технико-экономические исследования возможности крупнотоннажного производства висмута в нашей стране и оценка ресурсов висмута в СНГ показали, что только на базе разведанных месторождений висмута в Читинской области может быть обеспечено его рентабельное производство в объеме, достаточном для ввода с темпом 1 ГВт в год быстрых реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем электрической мощностью АЭС около 50 ГВт [8]. Кроме того, большие месторождения висмута имеются на Северном Кавказе (Кабардино-Балкария). Месторождения Казахстана способны обеспечить ввод ~250 ГВт. Японские исследователи оценили, что доступные мировые ресурсы висмута составляют около 5 млн т [6].

Следует также отметить, что в соответствии с общей геолого-экономической закономерности

стью количество минеральных ресурсов возрастает пропорционально квадрату цены, по которой потребитель готов покупать ресурсы. При мировых ценах на висмут его вклад в капитальные затраты на сооружение атомных станций малой мощности со свинцово-висмутовым теплоносителем по оценке проектировщиков не превышает 1%. Поэтому технико-экономические показатели АЭС ухудшатся незначительно и при возрастании цены висмута. Цена может быть значительно снижена, если для изготовления теплоносителя использовать неочищенные свинец и висмут. Это родственные трудно разделяемые химические элементы. Количественно этот эффект по влиянию на приведенную стоимость электроэнергии может быть определен после согласования цены теплоносителя, изготовленного по данной технологии, с заводом. При исчерпании дешевых ресурсов висмута возможен переход на сплав неэвтектического состава с уменьшенным содержанием висмута, но с повышенной точкой плавления. Например, при уменьшении содержания висмута в сплаве до 17% — примерно в 3 раза температура плавления увеличивается со 123,5 до 250 °С [2], что существенно ниже точки плавления чистого свинца.

Уровень технологической готовности применения свинцово-висмутового и свинцового теплоносителей. По этому показателю свинцово-висмутовый теплоноситель значительно превосходит свинцовый, так как имеется многолетний опыт эксплуатации реакторов на подводных лодках и наземных стендах-прототипах. На всех режимах он насчитывает около 80 реакторо-лет. Опыт эксплуатации, который сопровождался на начальном этапе освоения авариями, связанными с отсутствием необходимых знаний и опыта, не является в полной мере представительным [9]. Вместе с тем в части обслуживания, ремонта и замены оборудования, перегрузки и хранения отработавшего ядерного топлива, технологии теплоносителя, обеспечения радиационной безопасности при работах с оборудованием, загрязненным полонием, режимов размораживания этот опыт является представительным. Поэтому создание реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем связано со значительно меньшими техническими рисками.

Заключение. Быстрые реакторы, работающие в замкнутом ядерном топливном цикле, будут играть ключевую роль в крупномасштабной ядерной энергетике будущего, обеспечивая энергией на длительный период без ограничений на топливные ресурсы и выбросы вредных веществ в атмосферу и без потребления огромного количества кислорода [10]. При этом снижаются риски, связанные с поставками углеводородов. Развиваемые возобновляемые источники энергии могут заместить небольшую долю органического топлива в связи с низким КИУМ и выработкой только электрической энергии. Быстрые реакторы со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями могут работать в режиме топливного самообеспечения с коэффициентом воспроизводства, превышающим единицу, обеспечивая повышение безопасности и создавая предпосылки улучшения технико-экономических показателей.

Реакторы со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями имеют наименьший запас потенциальной энергии в теплоносителе, что позволяет реализовать в максимальной степени свойства внутренней самозащищенности и пассивной безопасности, исключить тяжелые аварии с эвакуацией или отселением населения. Реакторные установки такого типа будут обладать повышенной устойчивостью не только при единичных отказах оборудования и ошибках персонала, но и при умышленных злонамеренных действиях. Такие качества позволят преодолеть радиофобию населения, что важно для устойчивого развития ядерной энергетике.

Реакторы с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями, требующие этапа своего освоения, включая эксплуатацию в условиях АЭС, могут быть использованы для создания энергоблоков как большой единичной мощности, покрывающих базовую часть нагрузки, так и модульных малой и средней мощности, работающих в локальных или региональных энергосистемах в режиме следования за нагрузкой и вырабатывающих наряду с электрической тепловую энергию. Они позволят замещать угольные ТЭС, являющиеся основными загрязнителями окружающей среды.

Свинцово-висмутовый и свинцовый теплоносители, как и все другие теплоносители, имеют преимущества и недостатки. Они по-разному влияют на технико-экономические показатели,

безопасность и надежность АЭС. Предпочтение отдать тому или другому теплоносителю невозможно без создания демонстрационных образцов реакторных установок с такими теплоносителями и получения опыта эксплуатации в составе АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пыльченков Э.Х.** Вопросы замораживания-размораживания жидкометаллического свинцово-висмутового теплоносителя в контурах реакторных установок. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-98). Обнинск, 1999, т. 1, с. 103—112. // **Pylchenkov E.H.** The Issue of Freezing-Defreezing Lead-Bismuth Liquid Metal Coolant in Reactor Installations' Circuits. — In: Proc. Conf. on Heavy-Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies. (HLMC-98). Obninsk, 1999, v. 1, p. 110—119.
2. **Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-Hydraulics and Technologies.** OECD/NEA, 2015.
3. **Pankratov D.V., Yefimov E.I., Toshinsky G.I. e.a.** Analysis of polonium danger in nuclear power installations with lead-bismuth coolant. — In: Proc. of ICAPP'05. Korea, 15—19 May, 2005, Paper № 5497.
4. **Wiggs L., Cox-DeVore C., Voelz G.** Mortality among a cohort of workers monitored for Po-210 exposure: 1944—1972 yy. epidemiology section occupational medicine group. — Health Phys., 1991, v. 61, № 1, p. 71—76.
5. **Tupper R., Minuskin B., Peters F., Kardos Z.** Polonium hazard associated with lead-bismuth used as a reactor coolant. — In: Proc. Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles. Current Status and Innovations Leading to Promising Plants. Kyoto, Japan, 1991, v. 4, p. 5.6/1—5.6/9.
6. **Mihara T., Tanaka Y., Enuma Y.** A Conceptual design study on various types of HLMC fast reactor plant. — In: Intern. Working Material IAEA-AG-1076, IWG-FR104, 2000, p. 47—54.
7. **Cinotti L., Smith C., Sekimoto H. e.a.** Lead-cooled system design and challenges in the frame of Generation IV International Forum. — J. Nucl. Mater., 2011, v. 415, p. 245—253.
8. **Toshinsky G.I., Martynov P.N.** Large-scale use of bismuth in future nuclear power. — In: Bismuth: Characteristics, Production and Applications. Ch. 3. NY: Nova Sci. Publ., 2012, p. 95—22.
9. **Троянов В.М., Василенко В.А., Колики М.В. и др.** Опыт эксплуатации реакторов с теплоносителем свинец—висмут. — Атомная энергия, 2023, т. 134, вып. 3—4, с. 111—119. // **Troyanov V.M., Vasilenko V.A., Kolik M.V. e.a.** Lessons Learned on the Operation Experience for Lead-Bismuth Nuclear Power Reactors. — Atomic Energy, 2023, v. 134, № 3—4, p. 111—119.
10. **Стратегия 2021: Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года.** М., Госкорпорация «Росатом», 2023.

Поступила в Редакцию 14.03.24

УДК 621.039.534...23

ПОЯЧЕЙКОВЫЙ РАСЧЕТ ТВС ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ПО ПРОГРАММЕ МАТАДОР

*Залесов А.С., Чуркин А.Н., Баусов А.М. (АО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск)
e-mail: zalesov_as@grpress.podolsk.ru*

В рамках энергетических систем четвертого поколения ядерные установки с водой сверхкритического давления и быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем рассматриваются в качестве инновационных направлений развития атомных технологий. В настоящее время в АО ОКБ «Гидропресс» ведутся работы по обоснованию выбранной конструкции ТВС для ВВЭР-СКД и проектируются аналогичные СВБР-100 и СВЕТ-М реакторные установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Одна из особенностей перечисленных реакторов — высокая плотность теплового потока с поверхности твэлов, поэтому для предотвращения условий, приводящих к их перегреву, в ак-

тивной зоне планируют использовать конструктивные элементы для интенсификации теплообмена. Твэлы с навивкой на оболочке по спирали проволокой позволяют, с одной стороны, турбулизировать течение за счет дополнительной закрутки потока, с другой, обеспечить их дистанционирование.

Проволочная навивка существенно влияет на формирование гидравлических характеристик, поэтому должна учитываться в теплогидравлическом расчете активной зоны. Основная трудность расчета заключается в том, что в поячейковых программах отсутствует рекомендованный и общепризнанный подход к учету влияния проволочной навивки. В расчетных мо-