

БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ С ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ СВИНЕЦ-ВИСМУТ И СВИНЕЦ

Троянов В.М. (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, Россия), Тошинский Г.И. (АО «АКМЭ-инжиниринг», Москва, Россия, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, Россия), Гулевич А.В. (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, Россия), Петроченко В.В., Кондауров А.В. Комлев О.Г. (АО «АКМЭ-инжиниринг», Москва, Россия)

Введение

На протяжении короткого в историческом масштабе периода развития ядерной энергетики (ЯЭ) в разных странах на ряде АЭС с реакторами различных типов произошли маловероятные аварии различной степени тяжести, сопровождавшиеся значительными выбросами радиоактивности в окружающую среду и/или большим экономическим ущербом. Это авария на энергоблоке № 2 АЭС Three Mile Island в 1979 году (США) с реактором типа PWR, Чернобыльская авария на 4-м блоке АЭС с реактором РБМК в 1986 году (СССР), авария на АЭС Фукусима-1 в 2011 году (Япония) с реакторами типа BWR.

Это подорвало доверие к ЯЭ, что привело к снижению темпов ее развития, а в ряде стран к ее свертыванию. Одним из путей восстановления доверия населения к ЯЭ является создание реакторов с высоким уровнем внутренней самозащищенности и пассивной безопасности, к которым относятся быстрые реакторы (БР) с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ): эвтектический сплав свинец-висмут и свинец. В таких реакторах отсутствуют аккумулированная в теплоносителе потенциальная энергия сжатия и химическая энергия, способные при определенном маловероятном сочетании исходных событий вызвать выброс радиоактивности, требующий эвакуации населения. За счет отсутствия многих систем безопасности, требующихся в реакторах традиционных типов, обусловленного природными свойствами ТЖМТ, АЭС с такими реакторами могут оказаться более конкурентоспособными.

Кроме упомянутых общих свойств ТЖМТ, они обладают и отличающимися свойствами, по-разному влияющими на характеристики реакторных установок (РУ). В докладе проведен сравнительный анализ таких свойств и оценено их влияние на характеристики РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ) и свинцовым теплоносителями (СТ).

Отличающиеся природные свойства СВТ и СТ и их влияние на характеристики быстрых реакторов

1. Температура плавления

СВТ имеет значительно более низкую температуру плавления (124 °С) по сравнению со СТ (327 °С). Это приводит к отличию характеристик РУ.

Значительное расширение эксплуатационного температурного диапазона для СВТ в сравнении со СТ. Имея в виду, что температура обоих теплоносителей на выходе из активной зоны при одинаковых запасах от предельно допустимой должна быть ограничена одним и тем же значением (500–550 °С), определяемым коррозионной стойкостью сталей, температура теплоносителя на входе в активную зону для СТ должна быть существенно выше, чем для СВТ для исключения затвердевания СТ в переходных режимах, режимах пуска и расхолаживания. Это приводит к необходимости снижения подогрева СТ в активной зоне при одинаковой мощности, что может быть достигнуто только за счет повышения расхода. При соответствующем повышении скорости СТ в активной зоне это приведет к повышению мощности насосов в кубической зависимости от расхода. В случае же сохранения скорости СТ как для СВТ, это приведет к увеличению площади проходного сечения в активной зоне, что может быть достигнуто либо за счет увеличения ее диаметра, либо за счет уменьшения объемной доли топлива

при увеличении шага твэлов. В последнем случае потребуется повышение обогащения топлива делящимся изотопом, либо переход к более плотному топливу. Кроме того, при увеличении шага твэлов усложняется их дистанционирование. Поэтому при прочих равных условиях технико-экономические характеристики РУ при использовании СТ будут ниже.

Снижение для реакторов со свинцовым теплоносителем температурного запаса по коррозионной стойкости и длительной прочности феррито-мартенситной стали материала оболочек твэлов, что связано с вынужденным стремлением иметь как можно более высокую температуру СТ на выходе из активной зоны, в сравнении с СВТ, из-за вынужденного повышения температуры входа СТ. Хотя физико-химические основы технологии СВТ и СТ идентичны, более высокая температура «горячей» точки неизотермического контура для СТ затрудняет поддержание в стабильном состоянии защитного оксидного покрытия на оболочках твэлов, когда парциальное давление кислорода над Fe_3O_4 (защитное оксидное покрытие) возрастает, а поступление растворенного кислорода к наиболее «горячим» местам затруднено.

Более высокая температура плавления СТ повышает вероятность «замораживания» СТ в парогенераторе (ПГ) при нарушении нормальной эксплуатации и требует для исключения его «замораживания» при нормальной эксплуатации повышения температуры питательной воды, подаваемой в ПГ. Это приводит к необходимости повышения давления пара и, соответственно, температуры кипения воды, а также введения в тепловую схему второго контура дополнительного подогревателя питательной воды до температуры, заведомо превышающей температуру плавления свинца 327 °С. Все это удорожает и усложняет РУ, увеличивает долю затрат на собственные нужды (мощность питательных насосов) при незначительном увеличении КПД термодинамического цикла.

Затрудняет использование расхолаживания реактора через ПГ, требует введения в РУ малоэффективных воздушных теплообменников расхолаживания, и включения в воздушный тракт большого количества регулирующих шиберов для исключения «замораживания» СТ. В этом случае контур принудительной циркуляции не совмещается с контуром естественной циркуляции и для перевода РУ в режим расхолаживания может потребовать применения арматуры. Все это усложняет и удорожает РУ, ухудшает характеристики безопасности.

Для реакторов с СВТ малой мощности **возможно полностью пассивное расхолаживание** с отводом остаточного энерговыделения через корпус реактора, воздушный зазор и страховочный кожух непосредственно в водяной бак, в который погружен реактор, без риска «замораживания» СВТ.

Необходимость поддержания температуры СТ на уровне не ниже 400 °С исключает возможность выполнения ремонтных работ, замену оборудования и обслуживание РУ без применения роботизированных средств, требует значительного повышения мощности системы обогрева. В то же время при такой температуре исключается радиационное охрупчивание феррито-мартенситных сталей (материал оболочек твэлов реакторов с ТЖМТ). Для реакторов с СВТ с более низкой температурой на входе в активную зону для восстановления пластичности стали необходим кратковременный периодический отжиг радиационных дефектов при температуре около 500 °С.

2. Изменение объема при плавлении СВТ и СТ

Практика эксплуатации РУ с СВТ на АПЛ показала, что нельзя исключить несанкционированное «замораживание» теплоносителя в оборудовании РУ. Это вызывает необходимость безопасного для сохранения работоспособности оборудования режима и «размораживания» теплоносителя в РУ [1].

По литературным данным [2] для СВТ его объем при плавлении не изменяется. Именно этот факт обеспечил сохранение работоспособности оборудования РУ с СВТ после «размораживания» в том числе и всего первого контура РУ первой опытной АПЛ К-27 проекта 645 после нескольких лет выдержки в «замороженном» состоянии. Этому также способствовал сравнительно небольшой интервал температур от 20 °С до температуры плавления СВТ 123,5 °С при разогреве РУ, когда механические напряжения в оборудовании возникают за счет разности коэффициентов термического расширения СВТ и стали. Следует отметить еще одно свойство СВТ – медленное самопроизвольное увеличение объема СВТ в твердом состоянии, достигающее около 1,0 % за два месяца, обусловленное изменением кристаллической структуры [1]. В специально поставленных экспериментах наблюдалась медленная «самоэкструзия» СВТ из замкнутого объема через небольшое отверстие. Однако низкая твердость и высокая пластичность СВТ в твердом состоянии исключили возникновение повреждений оборудования.

В тоже время для свинца при плавлении объем увеличивается на 3,7 % [2]. Интервал изменения температуры в процессе разогрева от 20 °С до температуры плавления СТ 327 °С значительно выше, чем для СВТ. Эти факторы необходимо принимать во внимание при отработке режима «размораживания» СТ, имея в виду, что усадочные раковины, образующиеся при затвердевании свинца, будут образовываться в одних местах первого контура, а увеличение объема при плавлении будет происходить в других местах контура.

3. Генерация альфа-активного радионуклида ^{210}Po

По этому показателю СВТ значительно проигрывает СТ. Скорость генерации ^{210}Po в 10^4 раз превышает соответствующее значение в СТ.

В нормальных условиях эксплуатации полониевая активность СВТ никак себя не проявляет, хотя является источником потенциальной радиационной опасности, который необходимо учитывать при разработке проектов АЭС на базе РУ с СВТ и их эксплуатации. Радиологическая опасность ^{210}Po проявляется при попадании СВТ или контактирующего с ним газа в обслуживаемые помещения, что имело место при авариях и ремонтах реакторных установок АПЛ и наземных стендов-прототипов в период их освоения.

Как показал опыт эксплуатации РУ на АПЛ, выход аэрозолей ^{210}Po и радиоактивность воздуха в соответствии с законами термодинамики резко уменьшаются после снижения температуры и затвердевания пролитого сплава. Быстрое затвердевание пролитого СВТ ограничивает площадь радиоактивного загрязнения и позволяет удалять пролитый СВТ в виде твердого радиоактивного отхода.

Низкая концентрация полония в СВТ (на уровне 10^{-6} мол.) и образование термодинамически стойкого химического соединения полония со свинцом обуславливают низкую концентрацию ^{210}Po в воздухе при аварийной разгерметизации I контура.

Для выполнения ремонтно-восстановительных работ на «грязном» оборудовании, работ по удалению вытекшего теплоносителя (на стенде 27/ВТ до 20 тонн) были разработаны меры индивидуальной и коллективной защиты персонала (респираторы, защитная одежда, организация вентиляции), методы дезактивации оборудования и фиксации активности на поверхностях, приемы проведения ремонтно-восстановительных работ, снижающие риск попадания опасных количеств ^{210}Po внутрь организма и на кожные покровы.

Персонал, участвовавший в работах, подвергался периодическим медицинским обследованиям и, на основе многочисленных радиометрических анализов биопроб персонала (как военного, так и гражданского), было объективно установлено отсутствие

случаев носительства инкорпорированного полония в организме людей выше допустимых пределов [3].

Это подтверждает высокую эффективность применявшихся средств индивидуальной и коллективной защиты, правильность выбора технологии и организации ремонтно-восстановительных работ. Отсутствию серьезных радиационных последствий также способствовали сравнительно быстрое выведение полония из организма в результате обменных процессов (эффективный период полувыведения составляет около 30 суток) и очень низкая молярная концентрация полония в СВТ, соответственно снижающая его летучесть в сравнении с чистым полонием. Тем более это справедливо для РУ интегральной конструкции с защитным кожухом, что исключает возможность течей СВТ.

В одной из работ, опубликованных в США [4], приводятся данные ретроспективного анализа смертности среди когорты работников, занятых на работах с выделенным Po-210 в 1944–1972 гг. на Mound Facility и контролируемых по внутреннему облучению Po-210. Авторы проанализировали медицинские протоколы биоанализов (свыше 160 000 биопроб) группы белых мужчин в количестве 4402 человек (104 326 чел.×лет), работавших в этот период с Po-210, и сопоставили результаты наблюдений с официальными данными о причинах смерти 987 человек из этой группы за период по январь 1984 г.

Они также сравнили статистику по смертности этой группы с аналогичными данными двух контрольных групп лиц (средней по США и по штату Огайо) и сделали вывод об отсутствии связи между полученными дозами внутреннего облучения за счет инкорпорированного полония вплоть до 1 Зв (100 бЭР) и уровнем смертности по причинам злокачественных образований. Практически все тренды, характеризующие смертность от различных раковых заболеваний в изучавшейся когорте работников, были отрицательны, т.е. смертность была даже несколько меньшей, чем в двух контрольных группах.

Американские и японские специалисты, проведя свои исследования и проанализировав имеющийся опыт, также пришли к выводу, что образование полония в СВТ не является препятствием для его использования в ЯЭ будущего [5], [6]. Об этом также говорит тот факт, что в ряде стран ведутся работы, направленные на создание быстрых реакторов с СВТ (Россия – СВБР-100, Бельгия – MYRRHA, КНР – CLEAR и др.).

Следует отметить, что повышенная скорость генерации ^{210}Po в БР с СВТ полностью нивелируется при использовании СВТ или СТ в качестве жидких мишеней подкритических трансмутационных систем ADS. В таких системах под воздействием протонов высокой энергии ускорителя идут прямые каскадные реакции скалывания, в результате чего генерируются в больших количествах радионуклиды, гораздо более опасные в сравнении с ^{210}Po . Поэтому перенос результатов расчетов скорости генерации ^{210}Po для мишени ADS на БР с СВТ, как это сделано в работе [7], неправилен.

4. Ресурсы, масштаб производства и цена свинца и висмута

По этим характеристикам СВТ также уступает СТ. Свинец более широко распространен в природе, его разведанные ресурсы и масштаб производства не ограничивают применение СТ в ЯЭ, например, в реакторах типа БРЕСТ, цена свинца ниже цены висмута.

Имевшиеся до последнего времени литературные данные по разведанным ресурсам висмута не позволяли рассчитывать на использование СВТ в крупномасштабной ЯЭ. Однако относительно недавно специализированными предприятиями Росатома – ОАО «Атомредметзолото» и ВНИПИ промтехнологии – были выполнены технико-экономические исследования возможности организации крупнотоннажного производства висмута в России и оценка ресурсов висмута в странах СНГ. Их результаты

показали, что в России только на базе разведанных месторождений висмута в Читинской области может быть обеспечено его рентабельное производство в объемах, достаточных для ввода около 50 ГВт-э мощностей АЭС с БР, использующими СВТ, с темпом 1 ГВт-э в год [8]. Кроме того, большие месторождения висмута имеются на Северном Кавказе. Месторождения Казахстана способны обеспечить ввод ~250 ГВт-э. Японские исследователи оценили [8], что доступные мировые ресурсы висмута составляют около 5 миллионов тонн (без определения цены).

Следует также отметить, что в соответствии с общей геолого-экономической закономерностью количество минеральных ресурсов возрастает пропорционально квадрату цены, по которой потребитель готов покупать ресурсы.

При существующих мировых ценах на висмут его вклад в капитальные затраты на сооружение АЭС на базе РУ СВБР-100 не превышает одного процента. Поэтому технико-экономические показатели АЭС ухудшатся незначительно и при возрастании цены висмута.

Цена СВТ может быть значительно снижена, если для его изготовления использовать свинец и висмут, не очищенные предварительно от примесей висмута и свинца, соответственно, как это делалось ранее. Это родственные химические элементы, трудно отделяемые друг от друга.

В будущем, при исчерпании дешевых ресурсов висмута, возможен переход на сплав свинец-висмут неэвтектического состава с уменьшенным содержанием висмута, но с повышенной точкой плавления. Например, при уменьшении содержания висмута в сплаве до 17 % (в 3 раза) температура плавления увеличивается с 123,5 до 250 °С [2], что существенно ниже точки плавления чистого свинца (~327 °С) и еще не должно создавать больших трудностей при эксплуатации РУ. Кроме того, СВТ после исчерпания срока службы РУ после соответствующего рафинирования может быть использован повторно в других РУ.

5. Степень освоенности СВТ и СТ

По этому показателю, иногда его называют уровень технологической готовности (TRL – Technological Readiness Level) СВТ значительно превосходит СТ, так как имеется многолетний опыт эксплуатации реакторов с СВТ на российских АПЛ и наземных стендах-прототипах, насчитывающий около 80 реакторо-лет на всех режимах. Конечно, этот опыт эксплуатации, сопровождавшийся на начальном этапе освоения различными авариями, связанными с отсутствием необходимых знаний и опыта [9], не является в полной мере представительным для РУ гражданского назначения.

Вместе с тем полученный опыт в части обслуживания РУ, ремонтов и замены оборудования, перегрузки и хранения отработавшего ядерного топлива, режимов технологии теплоносителя, обеспечения радиационной безопасности при работах с оборудованием загрязненным полонием, режимов «размораживания» СВТ является достаточно представительным.

Поэтому создание РУ с СВТ связано со значительно меньшими техническими и финансовыми рисками.

Заключение

1) Быстрые реакторы, работающие в замкнутом ядерном топливном цикле (ЗЯТЦ), будут играть определяющую роль в крупномасштабной ЯЭ будущего, обеспечивая человечество энергией на длительный исторический период без ограничений по топливным ресурсам, выбросов вредных веществ в атмосферу и потребления огромного количества кислорода, снижая политические риски, связанные с поставками углеводородов.

2) Одними из потенциальных кандидатов на роль таких быстрых реакторов являются реакторы с ТЖМТ (свинец-висмут и свинец), способные работать в режиме

топливного самообеспечения с коэффициентом воспроизводства, превышающим единицу. Вместе с тем БР с ТЖМТ не позволяют обеспечить короткое время удвоения плутония, как в освоенных БР с натриевым теплоносителем, но благодаря природным свойствам ТЖМТ могут потенциально повысить безопасность и улучшить технико-экономические показатели.

3) РУ с СВТ и СТ имеют наименьший запас потенциальной энергии в теплоносителе, что позволяет реализовать в максимальной степени свойства внутренней самозащищенности и пассивной безопасности, исключить причины и смягчить последствия тяжелых аварий, требующих эвакуации населения. РУ такого типа будут обладать свойствами робастности, которые обеспечивают их повышенную устойчивость не только в случаях единичных отказов оборудования и ошибок персонала (влияние человеческого фактора), но и в случаях умышленных злонамеренных действий. Такие качества РУ с ТЖМТ должны позволить преодолеть радиофобию населения, вновь усилившуюся после аварии на АЭС Фукусима, что очень важно для устойчивого развития ЯЭ. Цепь безопасности будущей ЯЭ не должна иметь слабых звеньев. Как сказал третий Генеральный директор МАГАТЭ Ханс Бликс «Авария где-то, это авария везде».

4) РУ с ТЖМТ, требующие этапа своего освоения, включая получение реального опыта эксплуатации в условиях АЭС, могут быть использованы как для создания энергоблоков большой единичной мощности, покрывающих базовую часть нагрузки, так и для создания модульных АЭС малой и средней мощности, работающих в локальных или региональных энергосистемах в режиме следования за нагрузкой и вырабатывающих наряду с электрической энергией тепловую энергию. Они позволяют замещать угольные ТЭС, являющиеся основными загрязнителями окружающей среды.

5) СВТ и СТ, как и все другие теплоносители, обладают своими достоинствами и недостатками. Они по-разному влияют на технико-экономические показатели, безопасность и надежность АЭС. Однозначно отдать предпочтение тому или другому теплоносителю невозможно без создания и получения реального опыта эксплуатации опытных (демонстрационных) образцов РУ со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями в составе АЭС. Вместе с тем для РУ с СВТ технические и финансовые риски, всегда сопутствующие освоению любой инновационной технологии, будут значительно ниже соответствующих рисков для РУ с СТ, для которого отсутствует опыт применения в реакторных условиях.

Список сокращений

БР	– быстрый реактор
БРЕСТ	– быстрый реактор со свинцовым теплоносителем
ЗЯТЦ	– замкнутый ядерный топливный цикл
КПД	– коэффициент полезного действия
РБМК	– реактор большой мощности канальный
РУ	– реакторная установка
СВБР	– свинцово-висмутовый быстрый реактор
СВТ	– свинцово-висмутовый теплоноситель
СТ	– свинцовый теплоноситель
ТЖМТ	– тяжелый жидкометаллический теплоноситель
ЯЭ	– ядерная энергетика
ADS	– accelerated driven system
BWR	– корпусный кипящий реактор
PWR	– корпусный реактор с водой под давлением
TRL	– уровень технологической готовности

Список литературы

1. *E.H. Pylchenkov*. «The Issue of Freezing-Defreezing Lead-Bismuth Liquid Metal Coolant in Reactor Installations' Circuits», Proceedings of 1st International Conference on Heavy-Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC-98), Obninsk, Russia, 1999, Vol. 1, pp. 110–119.
2. Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, 2015 Edition, OECD-NEA.
3. *D.V. Pankratov, E.I. Yefimov, G.I. Toshinsky, L.D. Ryabaya*. «Analysis of Polonium Danger in Nuclear Power Installations with Lead-Bismuth Coolant». Proceedings of ICAPP'05, SEOUL, KOREA, May 15–19, 2005, Paper No. 5497 (CD-ROM), см. также в книге *Georgii Toshinskii*, Lead-Bismuth Cooled Fast Reactors (collection of selected articles and papers), LAMBERT Academic Publishing.
4. *Laurie D. Wiggs, Carol A. Cox-De Vore and George L. Voelz*. “Mortality among a Cohort of Workers Monitored for Po-210 Exposure: 1944–1972 y.y. Epidemiology Section Occupational Medicine Group”, Los-Alamos National Laboratory, Health physics, Vol. 61, No 1 (1991).
5. *R.B. Tupper, B. Minuskin, F.E. Peters, Z.L. Kardos*. “Polonium Hazard associated with Lead-Bismuth used as a Reactor Coolant”. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles. Current Status and Innovations Leading to Promising Plants. October 28– November 1, 1991. Kyoto, Japan. Proceeding, Vol. IV.
6. *Masakazu Ichimiya*, “A Conceptual Design Study on Various Types of HLMC Fast Reactor Plant”. Lead-Bismuth Technology International Meeting. December 12–14, 2000, OEC/JNC/Japan.
7. *Luciano Cinotti, Craig F. Smith, Hiroshi Sekimoto and all*. “Lead-cooled system design and challenges in the frame of Generation IV International Forum”, Journal of Nuclear Materials 415 (2011) 245–253.
8. *G.I. Toshinsky, P.N. Martynov*, «Large-Scale Use of Bismuth in Future Nuclear Power», Chapter 3 of the book «Bismuth: Characteristics, Production and Applications», pp. 95–122, New York, Nova Science Publishers, c2012.
9. *G.I. Toshinsky, V.S. Stepanov, L.B. Nikitin et al*. “The Analysis of Operating Experience of Reactor Installations Using Lead-Bismuth Coolant and Accidents Happened”. Proceedings of 1st International Conference on Heavy-Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC-98), Obninsk, Russia, 1999, Vol. 1, pp. 63–69 (см. также в книге *Georgii Toshinskii*, Lead-Bismuth Cooled Fast Reactors (Collection of Selected Articles and Papers), LAMBERT Academic Publishing.