

ТЕХНОЛОГИЯ СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ЯЭУ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЙ

А.Д. Ефанов, К.Д. Иванов, П.Н. Мартынов, Ю.И. Орлов

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского, г.Обнинск



Изложена краткая история освоения расплава свинец–висмут как теплоносителя в реакторных установках АПЛ. Выделены два основных этапа, связанные с эксплуатацией первого и второго поколений ЯЭУ с данным теплоносителем. Показаны основные проблемы технологии, характерные для этих этапов освоения теплоносителя, и пути их решения.

История практического освоения свинцово–висмутового расплава как теплоносителя реакторных установок началась более пятидесяти лет назад с создания первого циркуляционного стенда [1]. В конце 50–начале 60-х годов прошлого столетия в эксплуатацию были введены первые реакторные установки: стенд 27/ВТ (1959 г.) [2] и ППУ АПЛ проекта 645 (1963 г.). Эти установки принято считать первым поколением реакторных установок с теплоносителем свинец–висмут. Затем были созданы установки проектов 705 и 705К, сначала опытной АПЛ (заказ 900, 1970 г.), а затем серия АПЛ с ППУ БМ-40А и ОК 550 [4], включая наземный вариант, стенд КМ-1 [5] (конец 70 – начало 80-х годов). Эти реакторные установки относят ко второму поколению ППУ со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Общим для всех эксплуатировавшихся установок является петлевая схема размещения основного оборудования первого контура с его пространственным соединением трубопроводами, наличием вспомогательных линий для слива протечек в буферные емкости и линий возврата теплоносителя в основной тракт циркуляции. Конструктивное оформление этой общей схемы было различным не только между двумя поколениями установок, но и между двумя проектами второго поколения.

Вместе с тем, принципиальное отличие установок первого и второго поколения в большей мере состояло не в их конструктивном исполнении, а в реализованных условиях эксплуатации.

Главной проблемой РУ первого поколения явились практически не прекращающиеся течи парогенераторов по второму контуру из-за низкой вибростойкости трубок, и вследствие этого частые и длительные ремонты с разгерметизацией первого контура. Имели место значительные протечки масла из уплотнителей валов насосов и его попадание в теплоноситель. По существу, работа установок в таких условиях являлась штатным режимом эксплуатации. Варьировались лишь величины течей парогенераторов от нескольких литров воды в сутки до нескольких де-

сятков литров. В этих условиях шло постепенное накопление шлаков в первом контуре. Примерно через год-полтора эксплуатации РУ появились осязаемые признаки нарушения гидродинамики течения теплоносителя, выразившиеся в увеличении гидравлических сопротивлений и повышении локальных температур в активной зоне, а также в снижении расходов теплоносителя и неоднократных случаях потери проходимости в линиях воздушников. Масштаб шлакования первого контура АПЛ пр. 645, оцененный после аварии по результатам выполненных на реакторной установке правого борта мероприятий по ее очистке, составил величину не менее 0,15% от массы загруженного в установку теплоносителя. Это достаточно высокая степень зашлаковки, характерная для многих циркуляционных контуров в начальный период освоения свинцово-висмутового теплоносителя.

Негативное развитие процессов шлакования на РУ пр. 645 проходило, несмотря на проводимые технологические мероприятия. В частности, в августе 1964 г. при проведении водородной очистки было восстановлено ~ 8,6 кг PbO на установке левого борта и ~ 18,2 кг PbO на установке правого борта, соответственно в ноябре 1965 г. эти величины составили ~ 0,6 кг PbO и ~ 1,2 кг PbO. Однако восстановление шлаков проводилось только на свободных поверхностях теплоносителя при относительно низких температурах (230–300°C) [6]. Недостаточность проводимых технологических операций для преодоления негативных тенденций в шлаковании установок во многом связана с господствующими в то время представлениями о том, что путем очистки теплоносителя от избыточного кислорода можно обеспечить и чистоту циркуляционного контура. Это положение в данных конкретных условиях оказалось неверным. Потребовалась разработка более эффективного метода очистки контуров, основанного на эжекционном введении водорода в теплоноситель и его доставки непосредственно к шлаковым отложениям, находящимся под уровнем теплоносителя. С использованием этого метода достаточно быстро удалось очистить практически все лабораторные циркуляционные стенды, реакторные петли, первый контур ППУ АПЛ пр. 645 правого борта и стенд 27/ВТ-5. В последнем случае несмотря на значительные успехи в очистке (были очищены от шлаков парогенераторы, вспомогательные трубопроводы, основные тракты циркуляции теплоносителя и другие участки), не удалось полностью очистить активную зону. Это было связано с тем, что состав отложений в активной зоне содержал значительное количество не восстанавливаемых водородом шлаков на основе магния и углерода.

Существует мнение, что причиной осложнений в эксплуатации ЯЭУ первого поколения являются неудачно проведенные операции по перегрузке активных зон. Формальным основанием для существования такой точки зрения служит то, что действительно и авария на АПЛ, и занос шлаков в активную зону стенда 27/ВТ-5 произошли во вторую кампанию. Однако внимательный, непредвзятый анализ причин, вызвавших упомянутые выше осложнения, показывает, что они связаны не с самой перегрузкой зоны, а с общим состоянием первого контура.

В случае стенда 27/ВТ-5 в активную зону были занесены шлаки, оставшиеся в корпусе реактора после первой кампании. Наличие магния в шлаках, введенного в теплоноситель в первую кампанию, подтверждает эту точку зрения.

Реакторные установки АПЛ пр. 645 после перегрузки активных зон эксплуатировались еще в течение ~ 9 мес., при этом никаких новых существенных особенностей в эксплуатации не наблюдалось. В то же время условия эксплуатации установок не изменились: продолжались практически постоянные течи парогенераторов и связанные с ними ремонты, отмечались неоднократные случаи забивания линий воздушников, свидетельствующие о продолжающемся протекании про-

цесса шлакования установок. Последнее обстоятельство и связанное с этим ухудшение сепарирующих свойств первого контура относительно поступающего в теплоноситель при течах парогенератора водяного пара могло послужить спусковым механизмом развития аварии на реакторной установке левого борта [7].

Заканчивая рассмотрение технологических проблем и опыта их решения на установках первого поколения, необходимо отметить, что он не только показал, как не следует обращаться с теплоносителем свинец–висмут, одновременно этот опыт продемонстрировал исключительную «живучесть» установок в столь неблагоприятных условиях их эксплуатации.

К моменту ввода в строй ЯЭУ второго поколения был уже накоплен значительный опыт по обращению с данным теплоносителем. В условиях лабораторных стендов и промышленных установок были отработаны режимы эжекционной водородной регенерации, появилось понимание необходимости увлажнения водородосодержащих смесей, были созданы специальные технические средства для проведения этих технологических режимов и для контроля над ними [8].

Значительного прогресса удалось достичь в разработке оперативного метода контроля термодинамической активности примеси кислорода в теплоносителе [9]. Новые установки были снабжены соответствующими датчиками сначала в качестве опытных устройств, а в последующем и как штатных контрольных приборов.

Существенно изменилось и отношение к вопросам технологии теплоносителя. За решением этих вопросов осуществлялся постоянный контроль, начиная с момента подготовки теплоносителя и контура к заполнению на заводе-изготовителе и заканчивая выгрузкой отработавшей активной зоны и замораживанием теплоносителя после завершения эксплуатации установок.

Уже первые измерения параметра термодинамической активности кислорода на новых установках показали, что доминирующими процессами при их эксплуатации стали процессы потребления контуром растворенного в теплоносителе кислорода.

В последующем данный вывод был подкреплён путем баланса вводимого в первый контур установок кислорода при регламентных работах и выводимого из него при водородных регенерациях. На рис. 1 этот баланс для РУ АПЛ приведен в виде интегральных зависимостей от продолжительности эксплуатации установок.

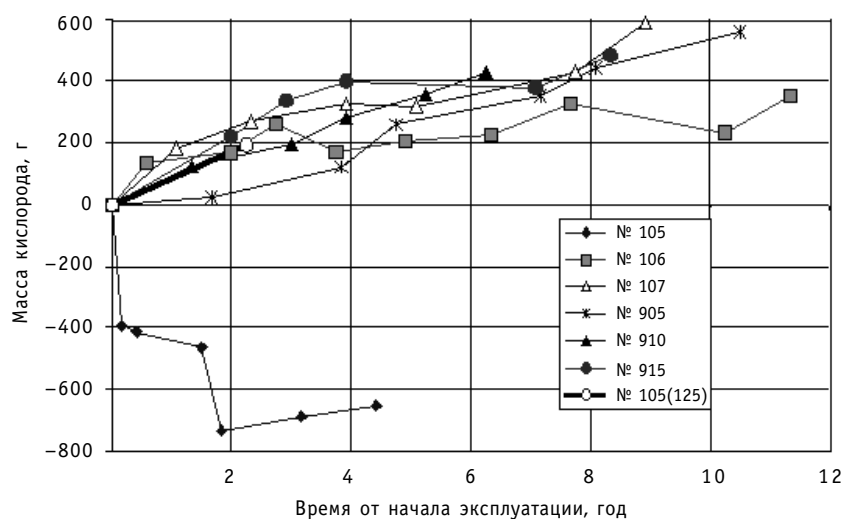


Рис. 1. Баланс вводимого и выводимого в ходе регламентных работ кислорода

На этом рисунке показано избыточное введение в первый контур кислорода для практически всех реакторных установок с соответствующими заводскими номерами. Исключение из общего правила составляет лишь эксплуатация РУ заказа 105 в начальный период, что, по-видимому, связано с исходным, более значительным загрязнением первого контура этой установки по сравнению с остальными. Относительно небольшое количество усвоенного первыми контурами кислорода за весь период эксплуатации связано в основном с тем, что подавляющая часть внутриконтурного оборудования подвергалась предварительной пассивации, а температурные условия работы конструкционных сталей можно отнести к умеренным.

В ходе эксплуатации установок постепенно был выработан унифицированный комплекс периодических технологических мероприятий, который незначительно отличался для ППУ ОК-550 и БМ-40А в некоторых деталях, учитывающих их конструктивные различия. Этот комплекс включал последовательное проведение технологических режимов обработки теплоносителя и первого контура восстановительными водородосодержащими смесями, окислительными пароводородными и кислородосодержащими газовыми смесями при различных температурах теплоносителя.

На рис. 2 в качестве примера показано изменение основных контролируемых параметров в ходе выполнения типичного комплекса, получившего название регламентных работ по технологии теплоносителя.

На данном рисунке приведено изменение во времени показаний датчика термодинамической активности кислорода, концентрации водорода при регенерации теплоноси-

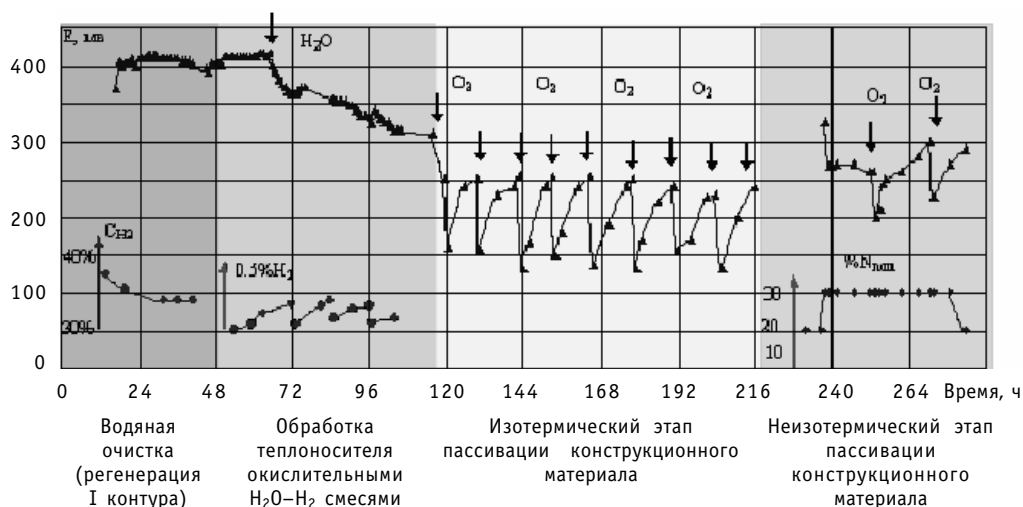


Рис. 2. Типичный характер изменения основных параметров в ходе регламентных работ

теля и в режиме обработки пароводородными смесями, подачи порций кислорода в изотермических условиях и при работе установки на мощности.

В основном эти работы носили профилактический характер. В начальный период технологический комплекс проводился один раз в год на каждой установке. Постепенно по мере накопления практического опыта, отработки диагностических режимов контроля состояния теплоносителя и первого контура периодичность использования данного комплекса была увеличена до одного раза в два – три года.

Наличие в составе регламентных работ изотермических режимов работы установок при повышенной температуре обуславливало определенные технические трудности обеспечения этих режимов, связанные с осушкой второго контура и необходимостью работы внешнего источника пара повышенных параметров. По-

этому отработывался альтернативный комплекс мероприятий, проводимых в не-изотермических условиях при работе установок на энергетических уровнях мощности.

Основные технологические режимы обработки теплоносителя восстановительными и окислительными пароводородными смесями с их эжекционным вводом в поток теплоносителя в таких условиях были отработаны на стенде КМ-1 [5]. Эти испытания показали, что несмотря на более низкую эффективность водородной очистки «холодных» участков первого контура, данный процесс имеет место, а в условиях относительно слабой загрязненности контура оксидами теплоносителя он является приемлемой заменой изотермического режима.

Как уже отмечалось, в ходе эксплуатации установок усиливалась диагностическая составляющая проводимых технологических работ. В их состав были введены специальные режимы для оценки состояния теплоносителя и первого контура. Суть этих режимов состояла в тестовых воздействиях на теплоноситель кислородосодержащими и водородосодержащими газовыми смесями, позволявшими по реакции системы делать выводы о ее физико-химическом состоянии. В частности, эжекционная обработка первого контура паро-водородными смесями при двух пониженных по сравнению с режимом водородной очистки уровнях содержания водорода позволила оценить не только скорость потребления кислорода внутренними поверхностями контура, но и оценить степень зашлаковки контура оксидами теплоносителя.

Рассмотренные выше два направления модернизации регламентных работ в практическом плане не получили широкого распространения, поскольку пришлось на заключительную стадию эксплуатации установок. Тем не менее, они отражают общие тенденции к упрощению технологического сопровождения эксплуатации установок со свинцово-висмутовым теплоносителем и усилению контроля над физико-химическим состоянием теплоносителя и первого контура.

Эксплуатация реакторных установок второго поколения, так же, как и первого, сопровождалась различными отклонениями от нормальных условий. Имели место случаи течи парогенераторов, попадания масла в теплоноситель и другие нарушения обычных условий [10]. Однако принципиальное отличие двух поколений установок заключалось в том, что, во-первых, работа РУ проектов 705 и 705К в таких условиях являлась скорее исключением, чем правилом, и, во-вторых, каждому такому случаю уделялось особое внимание. При необходимости проводились дополнительные технологические мероприятия по ликвидации последствий эксплуатации той или иной установки в условиях, отклоняющихся от нормальных. В качестве примера можно привести специальные технологические режимы, проводимые после завершения ремонтных работ или специальные режимы «отмывки» первого контура от масла и продуктов его пиролиза [10].

Нельзя не упомянуть в этой связи об уникальных возможностях тяжелых теплоносителей по формированию твердофазных пробок, герметизирующих трещины в элементах оборудования первого контура. В частности, на стенде КМ-1 был отработан и успешно осуществлен комплекс технологических мероприятий по «залечиванию» корпуса парогенератора [5], позволивший отказаться от длительных и трудоемких операций по демонтажу-монтажу парогенератора.

В целом, заканчивая сравнительное рассмотрение опыта решения вопросов технологии свинцово-висмутового теплоносителя на ЯЭУ первого и второго поколения, следует констатировать существенный прогресс не только в понимании протекающих в жидкометаллическом контуре процессов, но и в практическом освоении методов контроля и управляемого воздействия на эти процессы. Тот факт, что ни одна

из девяти реакторных установок второго поколения не была выведена из эксплуатации по причинам, относящимся к сфере проблем технологии теплоносителя, свидетельствует о том, что данная проблема на сегодняшний день перестала быть критической при использовании свинцово-висмутowego теплоносителя.

Вместе с тем данный вывод не означает, что все проблемы технологии решены. В настоящее время разрабатывается ряд новых проектов [11, 12, 13] с использованием тяжелых теплоносителей, в которых условия существенно отличаются от тех, которые были реализованы в эксплуатировавшихся установках. Они отличаются как по температурным условиям работы, схемному и конструктивному исполнению, масштабному фактору, так и по используемым конструкционным сталям, применению в ряде установок свинцового теплоносителя и, наконец, в ускорительно-управляемых системах, по наличию принципиально нового эффекта – генерации широкого спектра примесей за счет ядерных реакций в самом теплоносителе.

Естественно, все это потребует проведения дополнительных исследований и применительно к новым условиям адекватного отражения в методах и средствах технологии теплоносителя.

Литература

1. 50 лет освоения технологии тяжелых теплоносителей (свинец–висмут, свинец, галлий). – Обнинск, 2001.
2. Суворов Г.П., Бугреев М.И., Кузько О.В. Опыт создания и эксплуатации стенда 27/ВТ/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 1. – С. 70.
3. Драгунов Ю.Г., Степанов В.С. и др. Паропроизводящая установка БМ-40/А. Опыт создания и эксплуатации/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 1. – С. 88.
4. Митенков Ф.М., Антоновский Г.М. и др. Опыт создания и эксплуатации оборудования РУ ОК-550/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 1. – С. 84.
5. Филатов Б.В., Василенко В.А. и др. Стенд КМ-1. Опыт эксплуатации/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 1. – С. 80.
6. Карабаш А.Г. Химико-спектральный анализ и основы химической технологии жидкометаллического теплоносителя эвтектического сплава свинец–висмут/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 2. – С. 595.
7. Громов Б.Ф., Григорьев О.Г. и др. Анализ опыта эксплуатации реакторных установок с теплоносителем свинец–висмут и имевших место аварий/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 1. – С. 63.
8. Громов Б.Ф., Орлов Ю.И. и др. Проблема технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинец–висмут, свинец)/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 1. – С. 92.
9. Блохин В.А., Будилов Е.Г. и др. Опыт создания и эксплуатации твердоэлектролитных активометров кислорода в теплоносителе свинец–висмут/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 2. – С. 631.
10. Иванов К.Д., Мартынов П.Н. Опыт решения вопросов технологии теплоносителя свинец–висмут при эксплуатации установок АПЛ второго поколения/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 2. – С. 709.
11. Степанов В.С., Климов Н.Н. и др. Перспективные реакторные установки с жидкометаллическим теплоносителем свинец–висмут/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 2. – С. 415.
12. Орлов В.В., Филин А.И. и др. конструкция реакторов БРЕСТ электрической мощностью 300 и 1200 МВт/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных техно-

логиях». – Обнинск, 1999 – Т. 2. – С. 503.

13. *Цырлин М., Ледин Ш., Брановер К.* Использование тяжелых жидкометаллических теплоносителей в ускорительно-управляемых системах/Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 1. – С. 163.

Поступила в редакцию 1.09.2006

structure of resistant mineral-like new-formations isolating them from the environment. The treatment relies on the new non-oven technology of the self-propagating high-temperature synthesis (SHS), making it possible at high temperature to synthesize stable refractory matrix materials immobilizing biologically important radionuclides of the wastes.

УДК 621.039.543.4

The Properties of Modified Uranium Dioxide \ I.S. Kurina, V.V. Popov, V.N. Rumyantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 7 illustrations. – References – 15 titles.

The results of the researches directed on achievement of new modification of UO_2 fuel microstructure, produced with using of modernized wet technology are presented. This modification allows to improve the thermophysical properties of fuel pellets. It is established, the increase of the thermal conductivity of UO_2 in 2-3 times at 1000°C was achieved owing to the application certain special techniques in the procedures relating to precipitation which results in the formation of nanoparticles less than 30 nm in size. The experimentally-theoretical substantiation of increase of the thermal conductivity of UO_2 is presented.

УДК 621.039.5: 541.44

Irradiation Resistance of Zirconium and Yttrium Hydrides Doped with Erbium, Boron and Gadolinium \ N.G. Primakov, G.A. Birzhevoy, V.A. Rudenko, V.V. Kazarnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk 2007. – 9 pages, - References, 9 titles.

Results of investigating the resistance of hydrides of zirconium-erbium and zirconium-boron alloys (two-phase systems) and of hydrides of yttrium-gadolinium alloys (substitutional solid solution) to neutron irradiation in BR-10 fast reactor up to fluences of $3 \cdot 10^{25}$ n/m² at temperatures below 430° C are presented.

It is shown that swelling of yttrium-gadolinium hydrides is higher by factor of 3 as compared with the swelling of zirconium hydride.

УДК: 621.039.534.6: 539.175

Investigations of the Lead Based Liquid Metal Compositions by Neutron Scattering \ N.M. Blagoveshchenskiy, N.I. Loginov, V.A. Morozov, A.G. Novikov, A.V. Puchkov, V.V. Savostin, D.V. Savostin, A.L. Shimkevich; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk 2007. – 9 pages, 9 illustrations, – References, 25 titles.

In the article the results of investigations of microdynamics and microstructure of lead, lead-potassium and sodium-lead melts by method of neutron scattering are presented. Following microscopic characteristics are obtained: the dispersion curves, structure factors, radial distribution functions of atoms. The cluster configurations, which exist in liquid melt matrix, are discussed.

УДК: 621.039.534.6

Technology of Lead-Bismuth Coolant in NPP of the First and Second Generation \ A.D. Efanov, K.D. Ivanov, P.N. Martynov, Yu.I. Orlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk 2007. – 7 pages, 2 illustrations, – References, 13 titles.

A short history of studying the lead-bismuth alloy as coolant in submarine reactor installations has been put forth. Two basic stages associated with the operation of NPP of the first and second generation with this coolant have been singled out. The major technology problems characteristic of these stages of coolant studying and the ways of their solution have been demonstrated.