

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ В ГАЗОВЫХ КОНТУРАХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ТЯЖЕЛЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

П.Н. Мартынов, А.М. Посаженников, И.В. Ягодкин

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



В работе представлены результаты исследований процессов аэрозолеобразования и основных характеристик аэрозолей тяжелого теплоносителя в замкнутом газовом объеме над его поверхностью при различном состоянии поверхности раздела жидкий металл – газ и при струйном истечении свинца в воздушную атмосферу.

Предметом исследований являлись: дисперсный состав, концентрация, морфология аэрозольных частиц и их трансформация во времени, а также влияние различных факторов на интенсивность образования.

Физико-химические процессы, протекающие в контурах ЯЭУ с циркулирующим тяжелым жидкометаллическим теплоносителем, приводят к образованию мелкодисперсных частиц различной природы с последующим выходом их в газовые объемы в виде аэрозолей. Газовый контур реакторных установок – это многофункциональная система, в которой предполагается циркуляция радиоактивного газа по разветвленному контуру и поддержание требуемого компонентного состава газовой смеси на заданном уровне.

Если не принимать специальных мер по очистке циркулирующего газа от аэрозольных частиц, то возможны неблагоприятные последствия, связанные с ухудшением теплообмена на элементах газового оборудования, увеличением гидравлического сопротивления каналов, снижением работоспособности контрольно-измерительных приборов (датчики давления, гамма-датчики контроля разгерметизации оболочек ТВЭЛ и др.). Это может привести и к ухудшению радиационной обстановки, вследствие появления на оборудовании отложений примесей – источников ионизирующего излучения.

Разуплотнение газового контура ЯЭУ приведет к попаданию радиоактивных аэрозолей непосредственно в рабочие помещения со всеми вытекающими отсюда негативными последствиями. Образование радиоактивных аэрозолей в помещениях возможно также в результате аварийных течей жидкого металла из контура. Аэрозоли, образующиеся в воздухе при течах теплоносителя, также подлежат улавливанию системами аэрозольной очистки.

Для предотвращения указанных негативных последствий необходимо создание соответствующих фильтров по очистке газовых контуров от аэрозолей. При их разработке, в первую очередь, следует учитывать характеристики очищаемой газовой

среды, концентрацию и дисперсный состав содержащихся в ней аэрозольных частиц, и что на образование аэрозольных частиц в газовом объеме и интенсивность их отложения на оборудовании и аппаратуре оказывают влияние температурные и гидродинамические режимы эксплуатации жидкометаллического контура, периодическая обработка контура газовыми смесями, состояние свободной поверхности теплоносителя («чистая» или «зашлакованная») и другие факторы.

Исследование аэрозолей тяжелого теплоносителя включало в себя несколько основных этапов:

- исследование характеристик аэрозолей в газовом объеме над поверхностью теплоносителя в различных режимах работы экспериментальной установки, а именно, получение данных о концентрациях и дисперсном составе аэрозолей и изучение влияния различных температурных режимов и состояния поверхности раздела жидкий металл – газ на параметры аэрозольных продуктов в газовом объеме;
- исследование характеристик аэрозолей при изливе теплоносителя в воздушную атмосферу, т.е. получение данных о концентрациях и дисперсном составе образующихся аэрозолей при изливах конечных объемов теплоносителя с различной скоростью излива.

Для решения поставленных задач были созданы экспериментальные установки, моделирующие реальные условия и режимы работы с тяжелым теплоносителем.

В результате проведенных исследований получены данные по динамике изменения дисперсного состава, счетной и массовой концентрации аэрозольных частиц тяжелого теплоносителя в газовом объеме при различных технологических режимах: спокойное испарение сплава и кратковременный барботаж инертного газа сквозь его толщу, излив сплава в воздушную атмосферу.

В режиме спокойного испарения свинца зарегистрирован широкий спектр аэрозольных частиц по размерам, что позволяет говорить о высокой полидисперсности образующихся аэрозолей [1]. Для температурного режима 600°C отмечено, что крупные аэрозольные частицы размером $>3,0$ мкм практически отсутствуют и основной вклад в массовую концентрацию аэрозолей вносят частицы размером $0,4 \div 0,5$ мкм, счетная концентрация которых на начало экспериментов составляла величину $C \sim (1 \div 4) \cdot 10^5$ частиц/л, а на окончание соответственно – до $C \sim (0,4 \div 4) \cdot 10^4$ частиц/л. Отличие массовых концентраций аэрозольных частиц для точек отбора анализируемого газа на высотах 500 и 1000 мм от поверхности сплава при этой температуре незначительно: общая величина концентраций составляет на начало экспериментов ~ 100 мкг/м³, которая постепенно снижается до значений $\sim 10 \div 30$ мкг/м³. В то же время эксперименты, проведенные с отбором проб газа на высоте $h = 50$ мм над сплавом показали, что общая величина массовой концентрации аэрозолей в несколько раз выше ($C \sim 400$ мкг/м³) соответствующих величин в точках отбора $h = 500$ мм и $h = 1000$ мм. Необходимо заметить, что данные результаты по концентрациям аэрозолей свинца являются несколько заниженными, поскольку не учитывают количества аэрозольных частиц, осевших на внутренних поверхностях оборудования, холодильника, на подводящих газовых трубках за счет эффекта термофореза, гравитационного и инерционного осаждения частиц.

Для серии экспериментов при температуре теплоносителя $t = 450, 500^\circ\text{C}$ прослеживается та же общая тенденция снижения со временем концентрации аэрозольных частиц. Величины массовых концентраций аэрозолей свинца на начало экспериментов имеют максимальные значения, что наиболее достоверно отражает состояние и наличие аэрозольных частиц в газовом объеме бака. Сопоставление этих значений выявляет их зависимость от места отбора газа в буферной емкости. Анализ показывает, что при отборе газа на высотах $h = 500$ мм и $h = 1000$ мм над уровнем расплава

суммарные величины массовых концентраций аэрозольных частиц для температур 450 и 500 °С примерно одинаковы и составляют небольшие величины $\sim 20\div 30$ мкг/м³. Основной вклад в данные значения вносят частицы размером более 2,0 мкм. Проведение экспериментов на высоте отбора газа $h = 50$ мм показало, что величина массовой концентрации аэрозольных частиц для температур 450 и 500°С в несколько раз больше, чем в экспериментах с высотой пробоотбора газа $h = 500$ и 1000 мм. Эта величина составляет $\sim 100\div 120$ мкг/м³, основной вклад в которую вносят также частицы размером более 2,0 мкм.

Диаграммы сравнения счетных концентраций аэрозольных частиц размером $d = 0,4\div 0,5$ мкм, $2,0\div 3,0$ мкм и более 3,0 мкм для температур газа 450 и 600°С представлены на рис.3. Видно, что на начало экспериментов величины счетных концентраций аэрозольных частиц для температуры 600°С больше, чем для температуры 450°С. Для частиц размером $0,4\div 0,5$ мкм счетная концентрация отличается на порядок, для частиц размером $2,0\div 3,0$ мкм – в несколько раз. В дальнейшем значения концентраций частиц для обеих температур 450 и 600 °С снижаются до одинакового уровня: для частиц $0,4\div 0,5$ мкм – $C \sim (3\div 4) \cdot 10^3$ частиц/л, для частиц $2,0\div 3,0$ мкм и $>3,0$ мкм концентрация падает до нуля. Данный факт показывает, что время жизни крупных частиц ($d > 2,0$ мкм) незначительно. Они быстро оседают на внутренних поверхностях оборудования, а приток новых частиц таких размеров незначителен, ввиду малой величины расхода анализируемого газа ~ 2 л/ч в газовом контуре.

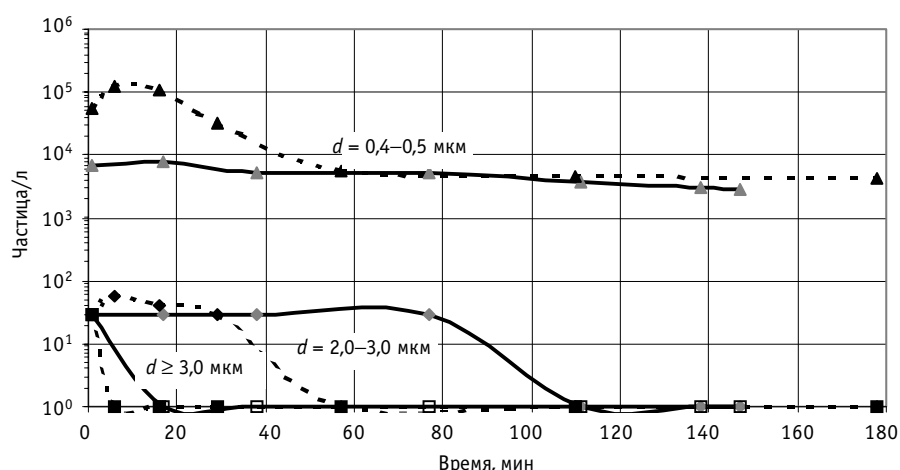


Рис. 1. Динамика распределения аэрозольных частиц свинцового т/н при испарении: ----- $t = 600^\circ\text{C}$; — $t = 450^\circ\text{C}$

Обобщенные данные по концентрациям частиц в зависимости от места (высоты) отбора анализируемого газа представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Обобщенные данные
по концентрациям частиц в зависимости
от места (высоты) отбора анализируемого
газа**

Температура сплава, °С	Общая массовая концентрация, мг/м ³		
	Высота отбора газа над сплавом, мм		
	50 мм	500 мм	1000 мм
600	0,4	0,13	0,12
500	0,1	0,05	0,03
450	0,1	0,03	0,02

Таким образом, процессы образования аэрозолей свинца в газовом объеме установки при температуре расплава 600°C протекают более интенсивно, чем при температурах 450 и 500°C . Массовые концентрации аэрозольных частиц при $t = 600^{\circ}\text{C}$ в несколько раз выше соответствующих величин для температур 450 и 500°C .

На втором этапе проводили исследования процессов образования аэрозольных частиц в газовом объеме установки в режиме возмущения поверхности расплава – кратковременный ($\sim 1,5 \div 2$ мин) барботаж инертного газа (Ar) через слой теплоносителя проводили при температурах 450 , 500 , 600°C . Отбор анализируемого газа из газового объема бака осуществляли на двух высотах над уровнем расплава: $h_1 = 50$ мм и $h_2 = 1000$ мм.

Анализ полученных результатов показывает, что для всех случаев характерна высокая величина массовой концентрации аэрозольных частиц. Для температурных режимов $t_1 = 600^{\circ}\text{C}$ эта величина начало экспериментов составляет $C_1 \approx 10 \div 13$ мг/м³, для $t_2 = 500^{\circ}\text{C}$ – $C_2 \approx 4,5 \div 6,5$ мг/м³, для $t_3 = 450^{\circ}\text{C}$ – $C_3 \approx 2 \div 3$ мг/м³. Эти значения на порядок выше соответствующих величин концентраций аэрозолей для режимов спокойного испарения с невозмущенной поверхности расплава.

Основную роль в данных величинах массовых концентраций играют крупные частицы размером более $2,0$ мкм, счетная концентрация которых достигает значений $\sim 10^4 \div 10^5$ частиц/л, что по сравнению с режимом спокойного испарения ($C \sim 10^2$ частиц/л) на $2-3$ порядка выше. Это связано с процессами диспергирования расплава и возможного выноса частиц сплава вместе с пузырями газа. В ходе каждого эксперимента по истечении $\sim 10 \div 15$ мин концентрация крупных частиц ($d \geq 2,0$ мкм) резко снижается до величин $\sim 10^2$ частиц/л и, как следствие, падает общая массовая концентрация частиц до значений $C \approx 20 \div 50$ мкг/м³.

В графическом виде динамика распределения аэрозольных частиц размером $0,4 \div 0,5$ мкм и $> 2,0$ мкм представлена на рис. 2. Видно заметное отличие (на порядок) концентраций крупных частиц $d > 2,0$ мкм для различных температур (600 и 450°C) в начале циркуляции газа, как следствие, различие по массовым концентрациям аэрозолей. В дальнейшем в ходе экспериментов по истечении $10 \div 30$ мин концентрация частиц $d > 3,0$ мкм снижается практически до нулевых значений, как и в случае со спокойным испарением. Это связано, как уже отмечалось выше, с осаждением данных частиц на внутренних поверхностях газового контура. Частицы размером $d = 0,4 \div 0,5$ мкм и $d = 2,0 \div 3,0$ мкм присутствуют в газовом контуре на протяжении всего

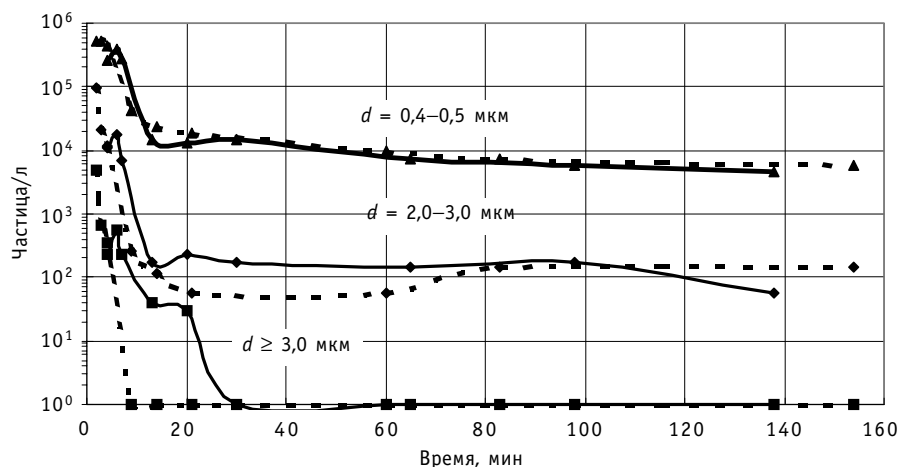


Рис. 2. Динамика распределения аэрозольных частиц свинцового т/н при барботаже: ---

$t =$

450°C ,

$t = 600^{\circ}\text{C}$

времени эксперимента (~140 мин) с концентрацией на уровне соответственно $C_1 \approx 7 \cdot 10^3$ частиц/л, $C_2 \approx 10^2$ частиц/л.

Таким образом, в режиме барботажного инертного газа через слой теплоносителя, по сравнению с режимом спокойного испарения, происходит резкое возрастание концентраций аэрозольных частиц до значений $\sim 10 \div 15$ мг/м³.

Последующие эксперименты по исследованию процессов аэрозолеобразования при изливе (течи) жидкого свинца проводились в два этапа. На первом этапе проливались различные массы металла с различной скоростью. С помощью лазерного спектрометра контролировалась концентрация и дисперсный состав аэрозолей до начала, в процессе и по окончании излива металла. В табл. 2 представлены параметры первой серии экспериментов. В последних столбцах приведены максимальные счетные и массовые концентрации образующихся аэрозолей (момент окончания излива металла).

Таблица 2

Параметры первой серии экспериментов

Эксперимент №	Время излива	Масса пролитого металла, кг	Скорость излива, кг/мин	Счетная концентрация, частиц/л	Массовая концентрация, мкг/м ³
1	9 мин	4,5	0,5	72675	900
2	5 мин	5,5	1,1	127260	2589
3	3 мин	7,2	2,4	455945	60356
4	3 мин	12	3	400452	550
5	7 мин	15,5	2,2	162085	4300
6	5 мин	21	4,2	421345	7720

Во всех экспериментах получены высокие значения массовой концентрации аэрозолей свинцового теплоносителя, колеблющиеся в зависимости от параметров излива от $C_m \sim 0,5$ мг/м³ (эксперимент № 4) до $C_m \sim 60$ мг/м³ (эксперимент № 3). Основной вклад в массовую концентрацию вносят крупные аэрозольные частицы $d > 5$ мкм (массовая концентрация аэрозолей в камере до начала процесса излива соответствовала значению $C_m < 0.001$ мг/м³).

По окончании процесса излива в течение 10–15 мин прослеживалась тенденция полного снижения счетной и массовой концентрации аэрозолей в два-три раза, что связано с седиментацией тяжелых крупных аэрозольных фракций.

Показания аэрозольного спектрометра дают основания говорить о высокой полидисперсности получаемых в процессе излива аэрозолей. Зарегистрированы частицы диаметром от 0.3 до 10 мкм (предел чувствительности прибора). Отбор пробы аэрозольных частиц на контрольный фильтроэлемент (мембрану) подтвердил полученные данные по дисперсному составу аэрозолей. Микрофотография мембраны с осажденными аэрозолями в отраженном и проходящем свете показана на рис. 3.

На рис. 4 приведены полученные зависимости счетных и массовых концентраций аэрозольных частиц в зависимости от параметров излива – скорости и массы излитого металла. Одинаковым цветом отмечены концентрации, присущие одному и тому же эксперименту. Как видно из графиков, прослеживается тенденция роста как счетных, так и массовых концентраций аэрозольных частиц свинцового теплоносителя с увеличением массы излитого металла и скорости излива. Очевидно, что при одина-

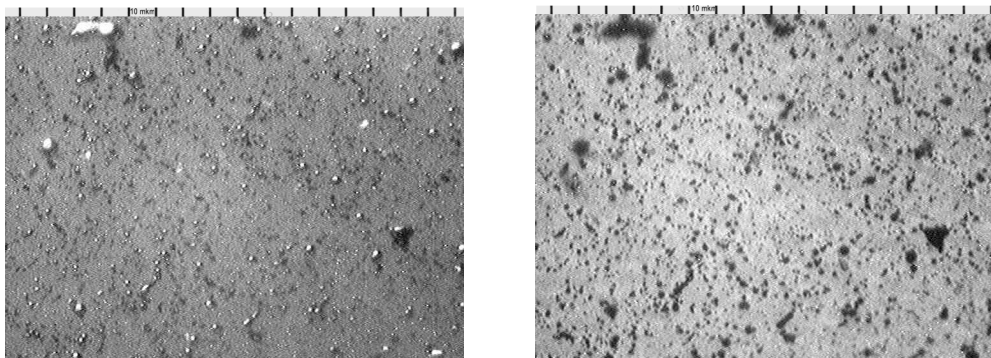


Рис. 3. Микрофотография аэрозольных частиц свинцового теплоносителя, осажженных на мембрану (деление шкалы соответствует 10 мкм)

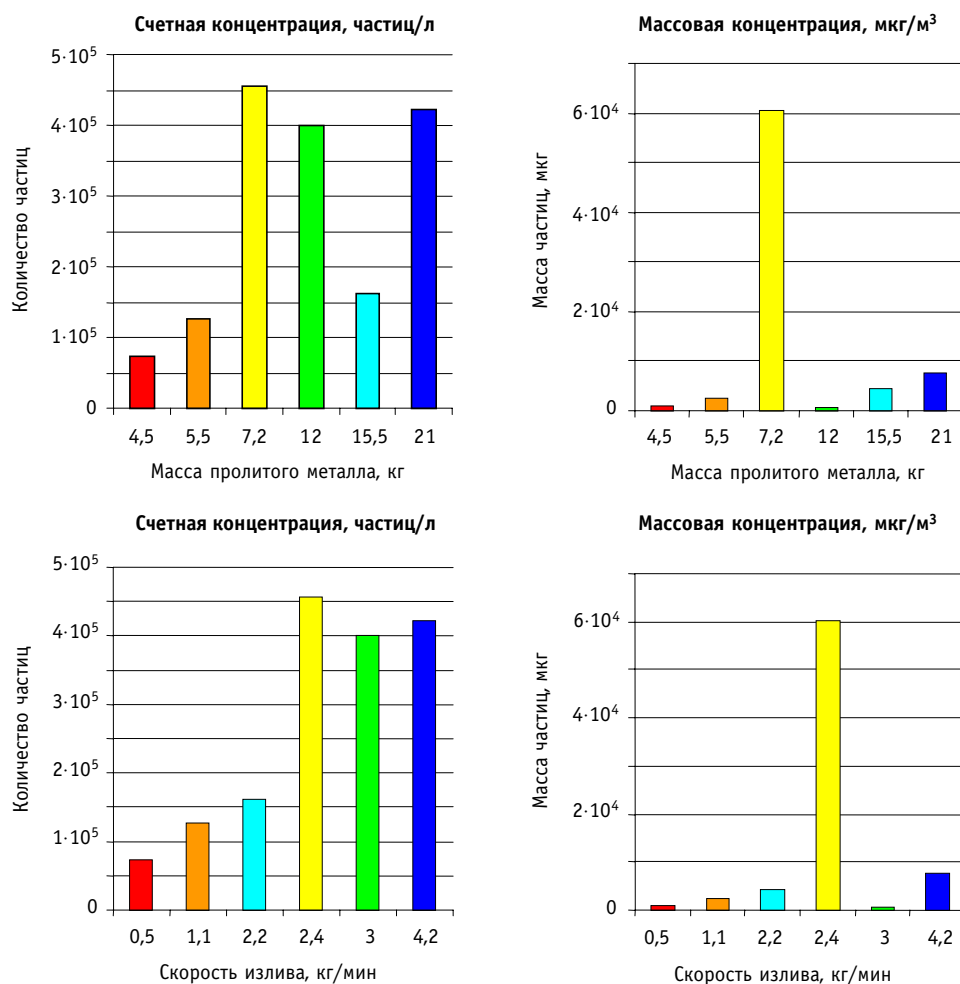


Рис. 4. Счетные и массовые концентрации аэрозолей свинца при различных параметрах излива

ковых условиях излива увеличение массы излитого металла (как следствие – рост времени контакта поверхности струи металла с газовой средой) должно вести к заметному росту мелкодисперсных фракций аэрозольных частиц, а увеличение скорости излива – к возрастанию степени диспергирования теплоносителя за счет соуда-

рения струи с поверхностью препятствия (воронки) и росту концентраций крупнодисперсных фракций, а значит и массовой концентрации аэрозолей. Однако, как показали экспериментальные данные, подобные тенденции нарушаются при наличии заметного отклонения струи от вертикального направления из-за помехи в сопле (при зашлаковывании последнего). Как результат – наблюдается резкий рост количества крупнодисперсных аэрозольных фракций и как следствие, – рост массовой концентрации аэрозолей в атмосфере реакционной камеры (желтые столбцы гистограммы). Наряду с этим явлением отмечается и обратное: при достаточно большой массе и скорости излива (зеленые столбцы – эксперимент № 4) не отмечен рост массовой концентрации аэрозолей, она оказалась самой низкой из всех полученных в экспериментах. При этом существенно выросла счетная концентрация в силу роста количества мелкодисперсных аэрозольных фракций. Таким образом, концентрации образующихся аэрозольных частиц при изливе теплоносителя в воздушную атмосферу в огромной степени зависят от степени диспергирования струи за счет соударения с препятствиями [2].

Полученные результаты по исследованию основных характеристик аэрозолей тяжелых теплоносителей (Pb, Pb–Bi) при различных условиях и режимах эксплуатации послужат основой для разработки теории и практики фильтрации газовых сред от аэрозольных частиц высокой плотности, с последующей разработкой и созданием соответствующих аэрозольных фильтров для защиты оборудования, персонала и окружающей среды.

Литература

1. Посаженников А.М., Мартынов П.Н., Ягодкин И.В., Кушнарёв Р.А. Характеристики аэрозолей свинцового теплоносителя/Сб. тезисов IV Международной конф. «ВОЗДУХ 2004». – С-Петербург, 2004.
2. Посаженников А.М., Мартынов П.Н., Ягодкин И.В., Кушнарёв Р.А. Исследование характеристик аэрозолей образующихся при изливе свинца в воздушную атмосферу/Сб. тезисов Отраслевого научно-технического семинара «Очистка газовых сред на предприятиях с ядерными технологиями». – Обнинск, 2003.

Поступила в редакцию 1.09.2006

УДК: 621.039.534.6

Solid Phase Technology of Oxygen Regulation in Heavy Liquid Metal Coolants \P.N. Martynov, R.Sh. Askhadullin, A.A. Simakov, V.S. Lanskih, A.Yu. Chaban, E.A. Machula; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk 2007. – 7 pages, 2 tables, 4 illustrations, – References, 9 titles.

The present work reflects results of investigations on substantiation of a method and means for maintenance of corrosion stability of steels in heavy lead-containing liquid metal coolants with reference to operation conditions of perspective nuclear power plants (BREST-OD-300, SVBR 75/100 etc.), various circulating stands, target accelerator-driven and technological static facilities.

УДК 621.039.534.6

Studies of Formation Processes and Performances of Lead and Lead-Bismuth Coolants Aerosols \P.N. Martynov, A.M. Posazhennikov, I.V. Yagodkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk 2007. – 7 pages, 2 tables, 4 illustrations, – References, 2 titles.

The report presents the results of investigations of aerosol formation processes and the main characteristics of lead coolant aerosols in the enclosed gas space above its surface at different states of the interface liquid metal/gas and at jet issue of lead into atmosphere.

The study the morphology of generated lead aerosols special attention has been paid.

УДК 621.039.534.6

On Condition of Impurity in Liquid metals \V.A. Morozov, A.V. Morozov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk 2007. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations, – References, 17 titles.

A condition of and lead is analyzed by a method of compensation effect. It is shown, that the compensation law allows to estimate the form of existence of the dissolved substances in alloys and entropy distinction of solvents. Compensation dependence is the consequence of linear data processing of experiment for any linearly represented characteristics.