

А. А. Фискков¹, В. В. Безлепки¹, С. Е. Семашко¹, В. М. Погребенков², А. А. Дитц²
(¹АО "АТОМПРОЕКТ", ²Томский политехнический университет;
e-mail: AAFiskov@atomproekt.com)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ НЕРАСТВОРИМЫХ АЭРОЗОЛЕЙ НА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ОТ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ АВАРИЯХ НА АЭС

Одной из проблем при аварии на атомных электростанциях (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором является выпаривание теплоносителя первого контура в защитной оболочке. Представлены результаты экспериментального исследования осаждения нерастворимых аэрозолей и солей борной кислоты на теплообменные поверхности системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки при тяжёлых авариях на АЭС. Показано незначительное влияние осаждения аэрозолей на работоспособность и эффективность работы данной систем.

Ключевые слова: тяжёлая авария, осаждение, аэрозоли, контейнмент, борная кислота.

Тяжёлые аварии на *атомных электростанциях (АЭС)* постулируются с малой вероятностью. В соответствии с российскими нормативно-техническими документами^{1,2}, для радиационных последствий реперного сценария тяжёлых аварий суммарная вероятность предельного аварийного выброса не превышает 10^{-7} 1/год на 1 реактор. В качестве тяжёлых аварий рассматривается сценарий аварий с разрывом трубопроводов Ду346 или Ду25, потерей теплоносителя и возможной деградацией активной зоны. В ходе аварий в атмосферу контейнмента возможен выход радиоактивных паров и аэрозолей, а также паров и аэрозолей конструкционных материалов. При проведении расчётов из условий химического и фазового равновесия, был показан выход аэрозолей и установлен молекулярный состав паров, вышедших в первый контур и контейнмент [1]. Массовый и компонентный состав радиоактивных паров, а также паров и аэрозолей конструкционных материалов рассчитывали с помощью кода СОКРАТ.

Аэрозоли при выходе в контейнмент делятся на два класса: аэрозоли, образованные внутри корпуса реактора (внутрикорпусные) и аэрозоли, образовавшиеся в результате событий вне корпуса реактора (внекорпусные). По источникам происхождения аэрозоли можно разбить по группам:

- газообразные продукты радиоактивного деления;
- аэрозоли продуктов деления;
- аэрозоли урановой группы и конструкционных материалов.

В проекте АЭС-2006³ при авариях предусмотрена *система пассивного отвода тепла от защитной оболочки (СПОТ ЗО)* [2-5]. Система пассивного отвода тепла от защитной оболочки состоит из четырёх одинаковых и полностью независимых один от другого каналов. Каждый канал включает в себя четыре теплообменника-конденсатора, локализирующую арматуру и трубопроводы.

¹ НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций;

² НП-032-01. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности;

³ <https://ru.wikipedia.org/wiki/АЭС-2006>

Теплообменники-конденсаторы расположены по периметру на внутренней стенке контейнента. Каждый теплообменник-конденсатор состоит из 132 вертикальных трубок высотой 5 м. Общая площадь теплообменной поверхности каждого канала составляет 300 м². Проектное включение и работа системы при аварии осуществляется на пассивном принципе, использующем физические законы теплообмена, и не требует внешних источников энергии, изменения состояния элементов схемы и действий оператора. При поступлении пароводяной среды в объём контейнента на поверхности теплообменников происходит конденсация пара с передачей тепловой энергии теплоносителю контура системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки. В результате в замкнутом контуре системы возникает естественная циркуляция газов и паров с отводом тепла к воде баков аварийного отвода тепла и от нее во внешнюю среду.

При конденсации аэрозоля и его осаждении на теплообменных поверхностях СПОТ 30 возможно уменьшение эффективности её работы [6]. Во время протекания аварии при выпаривания теплоносителя первого контура в контейнент вместе с паром попадает борная кислота (H₃BO₃), которая может самостоятельно или в виде солей кристаллизоваться на теплообменных поверхностях СПОТ.

При проектировании системы с использованием конденсаторов-теплообменников, находящихся в прямом контакте со средой первичной защитной оболочки, должна быть обоснована производительность теплообменника в условиях действия неконденсируемого газа и возможного осаждения и накопления нерастворимых примесей из паров и аэрозолей на теплообменных поверхностях⁴.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса осаждения нерастворимых аэрозолей и солей борной кислоты на теплообменные поверхности СПОТ 30 при тяжёлых авариях на АЭС.

1. Методика, оборудование и реактив

Масс-компонентный состав радиоактивных паров и аэрозолей (имитаторов продуктов деления), а также паров и аэрозолей конструкционных материалов, используемых в экспериментах, готовился на основе данных расчёта аварии Ду346 и Ду25 АЭС-2006 тяжёлоаварийным кодом СОКРАТ [7]. Для проведения экспериментов была разработана и смонтирована экспериментальная установка для осаждения аэрозоля, состоящая из ёмкости осаждения, парогенератора, камеры подготовки и распыления аэрозолей, сборников конденсата. Установка позволяет исследовать процесс конденсации аэрозолей из парогазовой фазы и измерять изменение теплообменных характеристик теплообменника-конденсатора при заданных условиях [8]. Ёмкость для осаждения аэрозоля выполнена из полированной стали марки 12X18H10T, рабочий объём 0,4 м³, рабочее давление до 0,4 МПа, рабочая температура внутри до 120 °С. Для снижения потерь тепла ёмкость закрыта теплоизоляционным кожухом.

⁴ Requirement EPC Contract Appendix 3, part 1, REQ-C1-984, ver. 5.0

Для подготовки аэрозоля с частицами заданного размера использовалась камера подогрева модельных порошков **имитаторов продуктов деления (ИПД)**. Камера располагается на линии подачи сжатого азота. Диспергация модельной смеси порошков внутри камеры и образование аэрозоля осуществлялась при помощи ультразвукового генератора. Унос аэрозоля в камеру подготовки аэрозоля происходил при помощи сжатого азота, поступающего с узла питания установки азотом.

В качестве теплообменника-конденсатора использовалась применяемая при монтаже СПОТ 30 вертикальная труба из стали марки 08X18H10T диаметром 0,038 м и толщиной стенки 0,003 м, длиной 2 м.

При анализе процессов, протекающих при тяжёлой аварии на АЭС, выделено четыре характерных стадии аварии, отличающихся скоростями конденсации, концентрацией и составом аэрозолей. На основании этого составлена матрица экспериментов проведения исследований, представленная в табл. 1.

Таблица 1

Матрица проведения экспериментов

Режим	Стадия аварии			
	I	II	III	IV
Пояснение к режиму	Основной выход аэрозолей ПД	Выход аэрозолей из расплава на дне корпуса реактора	Выход аэрозолей из расплава в УЛР	Осаждение аэрозолей после прекращения их выхода в контейнменте
Длительность осаждения аэрозолей, с	2000	6000	7000	35000
Концентрация аэрозолей, 10^{-3} , кг/м ³	5,7	8,3	15,3	15,3
В случае без работы СПОТ через парогенераторы				
Номер эксперимента	1	2	3	4
Давление в контейнменте, МПа	0,24	0,20	0,17	0,20
Температура в контейнменте, °C	106	95	95	93
Плотность пара, кг/м ³	0,614	0,438	0,314	0,473
Мощность, охлаждения СПОТ 30, МВт	7,93	5	2	6
ИПД	Cs ₂ MoO ₄	Fe; Cr; Ni; Nd ₂ O ₃ ; Zr; Mn	Fe; ZrO ₂ ; MnO	Нет
В случае с работой СПОТ через парогенераторы				
Номер эксперимента	5	6	7	8
Давление в контейнменте, МПа	0,25	0,20	0,19	0,23
Температура в контейнменте, °C	110	98	99	102
Плотность пара, кг/м ³	0,674	0,482	0,407	0,636
Мощность, охлаждения СПОТ 30, МВт	4	2	0,2	2
ИПД	Cs ₂ MoO ₄	Fe; Cr; Ni; Nd ₂ O ₃ ; Zr; Mn	Fe; ZrO ₂ ; MnO	Нет
В случае без работы СПОТ через парогенераторы				
Номер эксперимента	9	10	11	12
Давление в контейнменте, МПа	0,24	0,20	0,17	0,20
Температура в контейнменте, °C	106	95	95	93
Плотность пара, кг/м ³	0,614	0,438	0,314	0,473
Мощность, охлаждения СПОТ 30, МВт	7,93	5	2	6
ИПД	Cs ₂ MoO ₄ ; B ₂ O ₃	Fe; Cr; Ni; Nd ₂ O ₃ ; Zr; Mn; B ₂ O ₃	Fe; ZrO ₂ ; MnO; B ₂ O ₃	нет

2. Проведение экспериментов

В ёмкость для проведения экспериментов был смонтирован теплообменник-конденсатор. Проверяли отсутствие течей и циркуляцию жидкого теплоносителя через термостат при помощи насоса. Вакуумным насосом производили откачку воздуха из ёмкости до остаточного давления 0,005 МПа и проверку на протекание. С узла питания установки азотом из баллона по газовой линии подавали азот до требуемого давления (в соответствии с матрицей эксперимента). В течение 30 мин происходил нагрев ёмкости до заданной температуры. В предварительно нагретую ёмкость с узла питания установки паром через теплоизолированный паропровод подавали пар. При достижении заданного давления и температуры в соответствии с условием эксперимента ёмкость выдерживали от 10 до 20 мин для стабилизации всех параметров. Аппаратурно-технологическая схема установки для осаждения аэрозоля представлена на рис. 1.

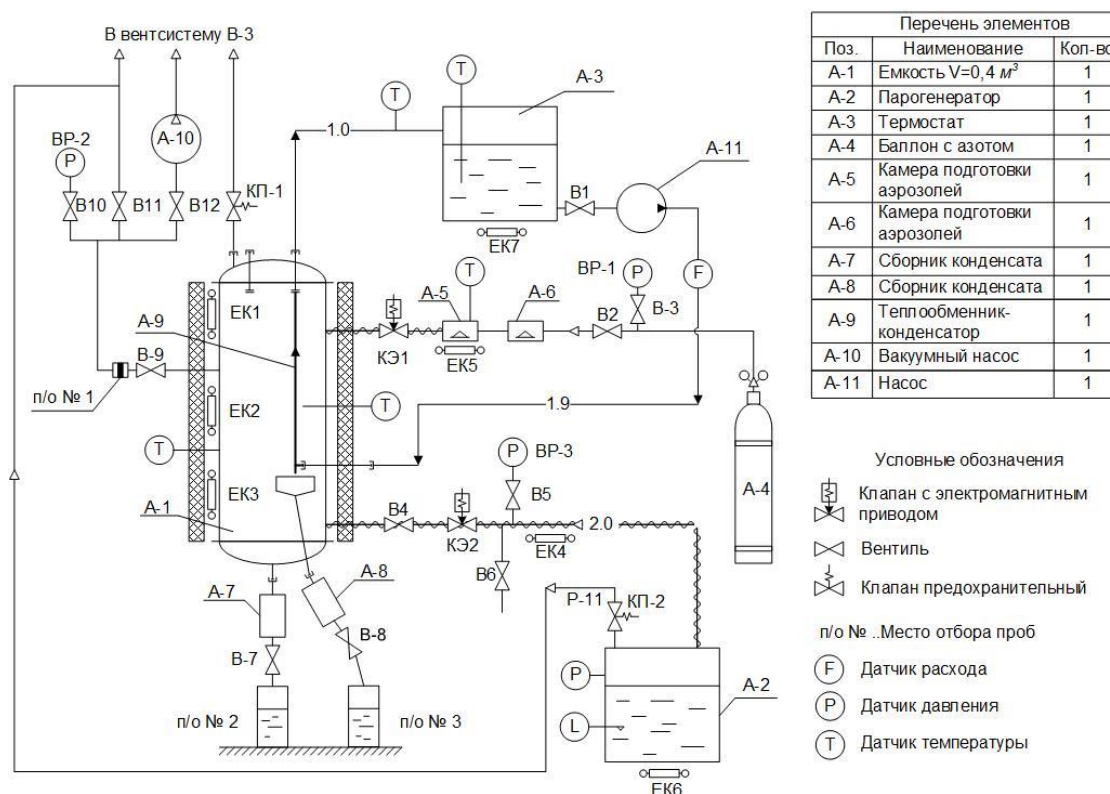


Рис. 1. Аппаратурно-технологическая схема установки для осаждения аэрозоля

С узла термостатирования жидкого теплоносителя в теплообменник-конденсатор подавали воду с требуемым расходом и температурой. Контроль и управление расходом теплоносителя, давлением пара и температурой осуществляли с компьютера. При достижении стационарных условий (температура воды, температура и давление парогазовой среды) в ёмкость с узла изготовления аэрозоля осуществляли напуск подогретой модельной смеси порошков в токе газа-носителя – азота.

В ёмкости, находящейся под давлением парогазовой смеси, на теплообменнике-конденсаторе происходит конденсация пара и осаждение аэрозоля. Конденсат с теплообменника и конденсат с внутренней поверхности ёмкости улавливали для проведения анализа в приемные накопительные ёмкости.

При переходе между стадиями температура внутри ёмкости уменьшалась за счёт уменьшения температуры стенки ёмкости. Сброс избыточного давления из ёмкости осуществляли по линии сдувки в вентиляционную систему.

Было проведено три серии экспериментов, имитирующих условия протекания аварий с работой системы пассивной отвода тепла от парогенератора и без неё. В отдельную серию было выделено исследование кристаллизации солей борной кислоты.

3. Результаты

В ходе проведения экспериментов в сборники А-7 с корпуса ёмкости и в А-8 с теплообменника-конденсатора производился пробоотбор конденсата с целью корректировки и поддержания элементного состава аэрозолей в заданном количестве, а также для анализа объёма получаемого конденсата, полученные данные представлены в табл. 2. В таблице также представлен элементный анализ конденсата после выпаривания конденсата.

Таблица 2

Объём конденсата с теплообменника в сборник А-8 и поверхности ёмкости сборник А-7
и элементный состав аэрозоля А-8/А-7

Эксперимент	Стадия аварии							
	I		II		III		IV	
	Объём конденсата, мл	Элементный состав	Объём конденсата, мл	Элементный состав	Объём конденсата, мл	Элементный состав	Объём конденсата, мл	Элементный состав
1	1705/143	Основные Mo, Cs (Cs ₂ MoO ₄). Следы Fe	-	Основные Fe, Mn. Следы Mo, Cs Zr	-	Основные Fe, Mn. Следы Zr	-	-
2	1643/181		3298/184		-		-	
3	1612/325		2960/1021		1595/277		-	
4	1702/722		2754/305		1621/316		23927/3435	
5	1298/210		-		-		-	
6	1146/312		2810/2097		-		-	
7	1302/850		2595/1230		2012/1905		-	
8	1320/420		2505/1260		1772/1810		24074/13110	
9	1640/340	Основные Mo, Cs (Cs ₂ MoO ₄), H ₃ BO ₃ . Следы Fe	-	Основные Fe, Mn, H ₃ BO ₃ . Следы Mo, Cs Zr	-	Основные Fe, Mn, H ₃ BO ₃ . Следы Zr	-	-
10	1570/350		2915/199		-		-	
11	1520/590		2906/189		1871/270		-	
12	1610/350		2873/189		2169/285		21991/1354	

Основной элементный состав аэрозолей как в конденсате, собранном с поверхности теплообменника, так и в конденсате с поверхности ёмкости осаждения, соответствует вводимым на соответствующей стадии развития аварии элементам аэрозолей. В конденсате, собранном на поздних стадиях развития аварии, содержание элементов, вводимых с аэрозолями на более ранних стадиях, фиксируется в меньшем количестве, вплоть до полного отсутствия водорастворимого аэрозоля Cs₂MoO₄. Борная кислота в серии экспериментов №№ 9-12 фиксируется в конденсате на всех стадиях.

Анализ осаждённых на теплообменные поверхности аэрозолей

Трубки теплообменника извлекались из ёмкости для исследований после каждого эксперимента и подвергались анализу на масс-компонентный состав и размер аэрозоля, характер осаждения, толщину слоя и т.д. Для определения элементного состава аэрозоля, осевшего на теплообменнике, готовили реплики с поверхности трубы на углеродный проводящий скотч. Затем данные реплики анализировались на электронном микроскопе JEOL JSM 6000 Neo Scop с приставкой EDS (элементного анализа). С учётом полученных объёмов конденсатов проводилась корректировка количества и состава аэрозолей в ёмкости осаждения после каждого пробоотбора, а также корректировался состав паровоздушной смеси путем подачи пара до заданного давления в соответствии табл. 1.

При проведении экспериментов №№ 2, 6, 10 осаждение аэрозоля проводили в две стадии. В экспериментах №№ 3, 7, 11 осаждение аэрозоля проводили в три стадии, в экспериментах №№ 4, 8, 12 в четыре стадии соответственно. Для экспериментов №№ 9-12 осаждение аэрозоля порошков ИПД проводили совместно с борной кислотой, концентрация которой составляла 16 г/кг воды в парообразном состоянии. После окончания эксперимента проводили отбор проб и изготовление реплик с разных участков трубы теплообменника. На рис. 2-4 представлены микрофотографии и элементный состав осевших на теплообменнике во время эксперимента аэрозолей верхней, средней и нижней частей теплообменника, соответственно. В качестве примера представлены результаты эксперимента № 4.

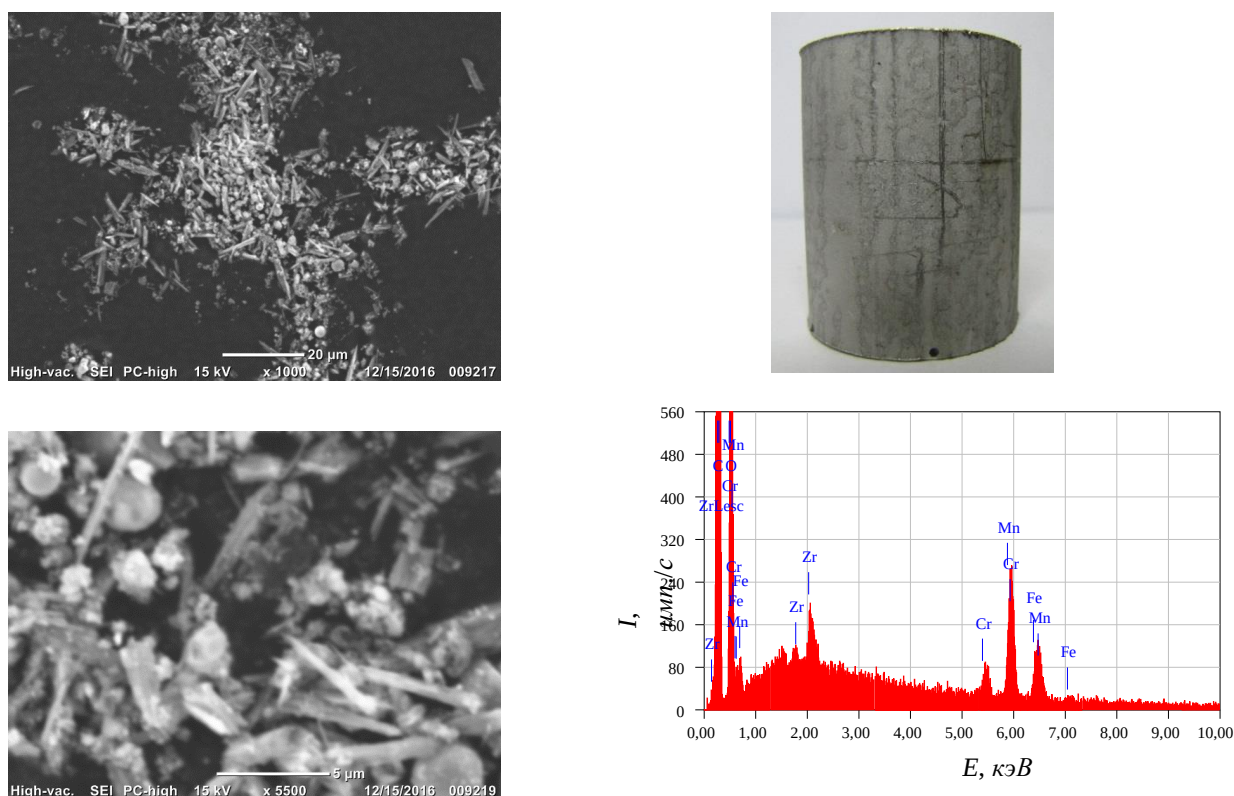


Рис. 2. Микрофотографии и элементный состав осевших аэрозолей на теплообменнике во время эксперимента № 4 с верхней части

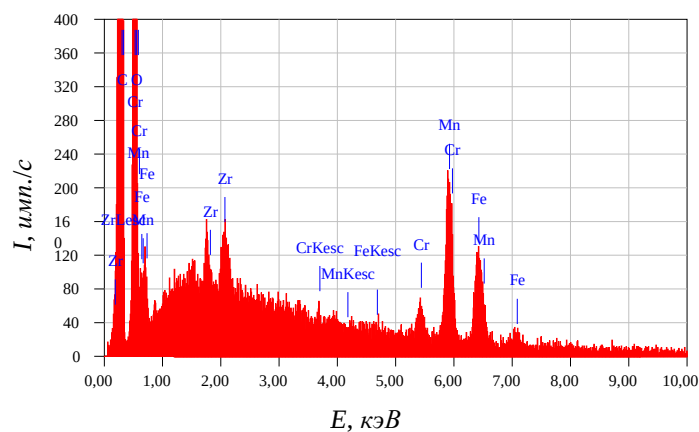
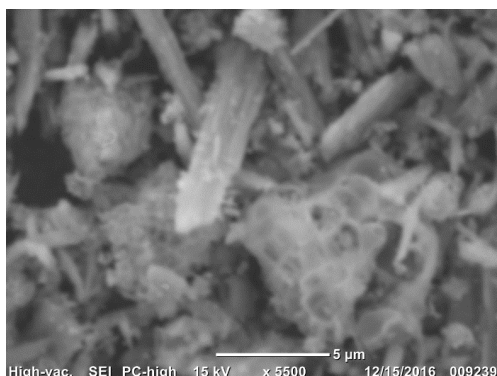
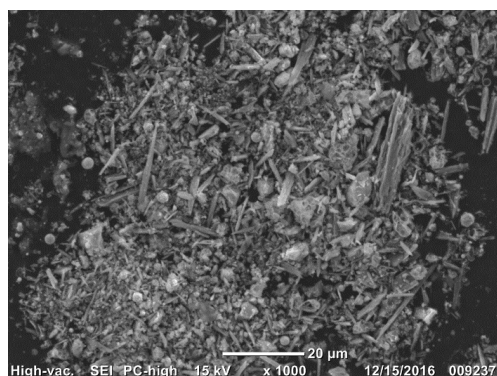


Рис. 3. Микрофотографии и элементный состав осевших аэрозолей на теплообменнике во время эксперимента №4 со средней части

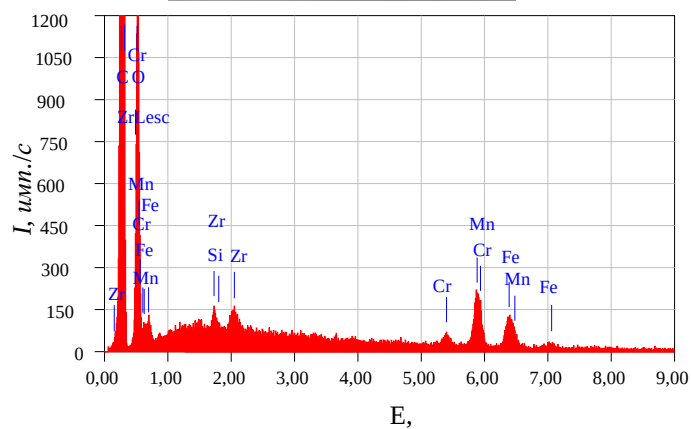
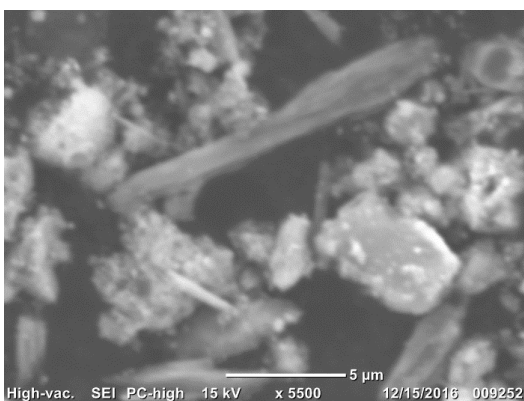
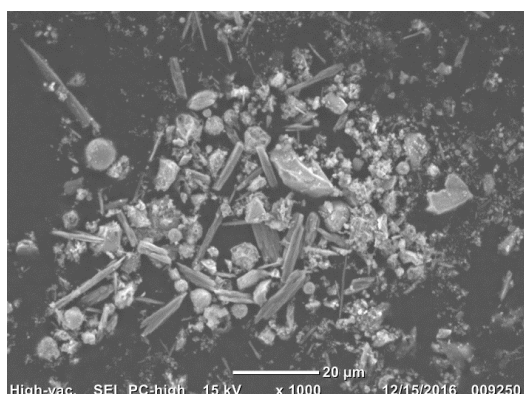


Рис. 4. Микрофотографии и элементный состав осевших аэрозолей на теплообменнике во время эксперимента № 4 с нижней части

На поверхности теплообменника-конденсатора оседают аэрозоли из парогазового пространства, характер оседания и состав осевших аэрозолей по длине теплообменника зависит от параметров эксперимента. Анализировались различные части теплообменника (верхняя, средняя и нижняя).

В большинстве экспериментов по данным электронной микроскопии в верхней части теплообменника происходит локальное оседание аэрозоля в виде вытянутых структур длиной до 50 мкм, толщиной до 4 мкм.

В средней части теплообменника осевший аэрозоль покрывает значительно большую площадь. Увеличение площади участков осевшего аэрозоля в средней и нижней частях трубы теплообменника обусловлено частичным смывом осевших частиц конденсатом с верхней части. Аэрозоль высаживается на теплообменнике в виде агломератов частиц неправильной формы и в виде исходных частиц неправильной обломочной формы. При большем увеличении хорошо видны границы частиц и рыхлый поверхностный слой, на котором различимы индивидуальные нано- и микроразмерные частицы.

На нижней части теплообменника аэрозоль осаждается более мелкими фрагментированными агломератами – "островами", что объясняется возросшим потоком конденсата и смывом части аэрозоля. Влияние стекающего конденсата сказывается и на распределении по размеру осевших частиц аэрозоля в разных частях теплообменника. Более мелкие частицы аэрозоля наблюдаются на поверхности верхней части теплообменника, где количество стекающего конденсата наименьшее, а в нижней части теплообменника остаются наиболее крупные частицы аэрозоля. Визуальная оценка дисперсности осевшего аэрозоля по всей высоте теплообменника и дисперсности твердых частиц исходного вводимого аэрозоля свидетельствует о том, что наиболее дисперсные частицы (< 1 мкм) смываются конденсатом в большей степени.

Исследование элементного состава осевшего на поверхности теплообменника аэрозоля на разных стадиях развития аварии показало, что фиксируются элементы, вводимые имитирующими продукты деления нерастворимыми частицами аэрозоля, в то время как водорастворимые аэрозоли B_2O_3 и Cs_2MoO_4 не обнаружены.

Выводы

Изучено влияние условий, имитирующих протекание тяжёлых аварий по параметрам – температура, давление, плотность пара, масс-компонентный состав аэрозоля, на процесс осаждения аэрозолей на разных стадиях развития аварий.

Осаждение аэрозоля на поверхности теплообменника происходит неравномерно в виде фрагментированных рыхлых участков. Стекающий конденсат оказывает значительное влияние на количество и распределение по размеру осевших частиц аэрозоля в разных частях теплообменника. Более мелкие частицы аэрозоля наблюдаются на поверхности верхней части теплообменника, где количество стекающего конденсата наименьшее, а в нижней части теплообменника остаются наиболее крупные частицы аэрозоля. Наибольшее количество аэрозоля фиксируется в средней части теплообменника.

С увеличением времени осаждения толщина и площадь поверхности, покрытой осажденным аэрозолем, увеличивается.

Элементный состав аэрозоля на каждой стадии аварии преимущественно представлен тяжёлыми нерастворимыми компонентами. Осаждение борной кислоты и её солей на поверхности теплообменника не наблюдалось. Борная кислота присутствовала лишь в следовых количествах.

Характер осаждения аэрозолей позволяют сделать вывод о незначительном их влиянии на работоспособность СПОТ ЗО.

Литература

1. Powers D. A., Brockmann J. E., Shiver A. W. Vanesa: A Mechanistic Model of Radionuclide Release and Aerosol Generation During Core Debris Interactions with Concrete, SAND85-1370, NUREG/CR-4308 (September 1985) Draft.
2. IAEA-TECDOC-DRAFT. Description of natural circulation and passive safety systems in water cooled nuclear power plants. Vienna, 2004. 112 p.
3. Бахметьев А. М., Большухин М. А., Бабин В. А. Задачи расчётно-экспериментального обоснования СПОТ ЗО для АЭС нового поколения // Сборник трудов 5-й междунар. науч.-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". Т. 2. Подольск: ОКБ "Гидропресс", 2007. С. 303-308.
4. Василенко В. А., Мигров Ю. А., Засуха В. К. Значение и место крупномасштабного стенда КМС в решении проблем безопасности АЭС с ВВЭР // Атомная энергия. 2013. Т. 115. Вып. 4. С. 189-192.
5. Безлепкин В. В., Затевахин М. А., Кректунов О. П. Экспериментальное исследование системы отвода тепла из объёма защитной оболочки на СМК // Атомная энергия. 2013. Т. 115. Вып. 4. С. 197-201.
6. Пискунов В. Н. Теоретические модели кинетики формирования аэрозолей. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000.
7. Bolshov L., Strizhov V. SOCRAT – The System of Codes for Realistic Analysis of Severe Accidents // Proceedings of ICAPP'06, USA, 2006. P. 6439.
8. Ульянов Б. А., Бадеников В. Я., Лукучев В. Г. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие. Ангарск: изд-во АГТА, 2006. 754 с.

Материал поступил в редакцию 16 ноября 2018 г.

Для цитирования: Фиськов А. А., Безлепкин В. В., Семашко С. Е., Погребенков В. М., Дитц А. А. Исследование осаждения нерастворимых аэрозолей на теплообменных поверхностях системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки при авариях на АЭС // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 1 (83). – 2019. – С. 24-33. DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.24-33.

A. A. Fiskov, V. V. Bezlepkina, S. E. Semashko, V. M. Pogrebenkov, A. A. Ditz
INVESTIGATION OF THE DEPOSITION OF INSOLUBLE AEROSOLS
ON THE HEAT EXCHANGE SURFACES OF THE SYSTEM
OF PASSIVE HEAT REMOVAL FROM THE CONTAINMENT
DURING ACCIDENTS AT NUCLEAR POWER PLANTS

One of the main problems during accidents at nuclear power plants (NPP) with water-cooled water-moderated power reactors is evaporation of primary coolant into the containment. Non-soluble aerosols together with steam enter the containment; they can deposit on heat-exchanging or other surfaces of equipment in the containment in the form of salts or as is, thereby reducing efficiency of the containment passive heat removal system.

It was studied how conditions that simulate severe accidents (such parameters as temperature, pressure, steam density, aerosol mass composition) influence aerosol deposit at different SA stages. The article presents the results of an experimental study of the process of deposit of non-soluble aerosols and boric acid salts on heat-exchanging surfaces of the containment passive heat removal system (PHRS) in case of severe accidents at NPP; insignificance of aerosol deposit influence on the efficiency of containment PHRS operation is demonstrated.

Key words: severe accident, deposit, aerosols, containment, boric acid.

References

1. Powers D. A., Brockmann J. E., Shiver A. W. Vanesa: A Mechanistic Model of Radionuclide Release and Aerosol Generation During Core Debris Interactions with Concrete, SAND85-1370, NUREG/CR-4308 (September 1985) Draft.
2. AEA-TECDOC-DRAFT. Description of natural circulation and passive safety systems in water cooled nuclear power plants, Vienna, 2004, 112 p.
3. Bakhmetyev A. M., Bolsukhin M. A., Babin V. A. *Zadachi raschyotno-ehkspperimental'nogo obosnovaniya SPOT ZO dlya AEHS novogo pokoleniya* [Objectives of calculation-experimental justification of Containment PHRS for nuclear power plants of a new generation]. *Sbornik trudov 5-j mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Obespechenie bezopasnosti AJeS s VVJeR"* [Proceed. of 5th International scientific and technical conference "Ensuring safety of nuclear power plants with water-water energetic reactor"], vol. 2, Podolsk, OKB Gidropress Publ., 2007, pp. 303-308.
4. Vasilenko V. A., Migrov Yu. A., Zasukha V. K. *Znachenie i mesto krupnomasshtabnogo stenda KMS v reshenii problem bezopasnosti AEHS s VVEHR* [Significance and role of KMS large-scale facility for solving safety issues of power plants with water-water energetic reactor]. *Atomnaya ehnergiya / Atomic Energy*, 2013, vol. 115, no. 4, pp. 189-192.
5. Bezlepkina V. V., Zatevakhin M. A., Krektunov O. P. *Ehkspperimental'noe issledovanie sistemy otvoda tepla iz ob'ema zashchitnoj obolochki na SMK* [Experimental study of heat removal system from containment on CMK]. *Atomnaya ehnergiya / Atomic Energy*, 2013, vol. 115, no. 4, pp. 197-201.
6. Piskunov V. N. Пискунов В. Н. *Teoreticheskie modeli kinetiki formirovaniya ajerozolej* [Theoretical models of aerosol formation kinetics]. Sarov, RFNC-VNIIEF Publ., 2000.
7. Bolshov L., Strizhov V. SOCRAT – The System of Codes for Realistic Analysis of Severe Accidents. Proceedings of ICAPP'06, USA, 2006, p. 6439.
8. Ulyanov B. A., Badenikov V. Ya., Lykuchev V. G. *Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii* [Processes and devices of chemical technology]. Angarsk, Angarsk State Technical University Publ., 2006, p. 754.

For citation: Fiskov A. A., Bezlepkina V. V., Semashko S. E., Pogrebenkov V. M., Ditz A. A. Investigation of the deposition of insoluble aerosols on the heat exchange surfaces of the system of passive heat removal from the containment during accidents at nuclear power plants. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 1 (83), 2019, pp. 24-33 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.24-33.