

АНАЛИЗ ВЫВЕДЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ИЗ АТМОСФЕРЫ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ С ПОМОЩЬЮ СПРИНКЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ

Савекин С.С., Шмельков Ю.Б. (НИЦ «Курчатовский Институт, Москва, Россия)

Введение

Основа безопасности атомных станций – предотвращение и ограничение выхода радиоактивных продуктов деления за предусмотренные проектом границы и последствий их выхода в части воздействия на население и персонал. Обеспечение безопасности атомных станций осуществляется в том числе за счет использования систем безопасности.

Спринклерная система является одной из систем безопасности АЭС. За счет работы спринклерной системы достигается как снижение давления в защитной оболочке, так и снижение активности продуктов деления (ПД) в ее атмосфере.

При авариях радиоактивные ПД поступают в атмосферу защитной оболочки в четырех формах: 1) радиоактивные благородные газы, 2) трудноулавливаемые органические соединения йода (например, йодистый метил), 3) неорганические соединения йода (молекулярный йод), 4) ПД на аэрозолях. В данной работе речь пойдет об аэрозольной форме ПД.

1. Механизмы захвата каплями аэрозолей

Снижение активности аэрозольных ПД за счет работы спринклерной системы характеризуется скоростью выведения, которая в свою очередь связана с эффективностью выведения. Суммарная эффективность выведения аэрозолей ПД определяется эффективностями отдельных механизмов, которые описаны ниже.

1.1. Инерционное взаимодействие частицы и капли

Инерционное взаимодействие характеризуется тем, что частицы могут пересекать линии тока капель за счет своей инерции. Эффективность этого процесса определяется функцией, параметром которой является число Стокса.

1.2. Перехват частицы

В случае перехвата частицы будут перехвачены, если их радиус проходит через траекторию капель. Эффективность процесса определяется функцией, параметром которой является отношение диаметра частицы к диаметру капли.

1.3 Броуновская диффузия

Броуновская диффузия приводит к тому, что очень маленькие частицы сталкиваются с каплями за счет Броуновского движения. Эффективность этого процесса определяется функцией числе Рейнольдса и Шмидта.

1.4. Диффузиофорез

При диффузиофорезе аэрозольные частицы попадают на капли спринклеров за счет конденсации пара на каплях.

1.5. Термофорез

При термофорезе температурные градиенты вызывают движение аэрозольных частиц к поверхностям конденсации. Однако, для типичных атмосферных условий в защитной оболочке (насыщенная пароводяная смесь) термофорез будет незначительным по сравнению с диффузиофорезом, вследствие чего им можно пренебречь [1].

2. Моделирование работы спринклерной системы

Описанные выше механизмы (за исключением термофореза) были учтены при численном моделировании работы спринклерной системы с помощью расчетного кода MABP-TA [2] в экспериментах TOSQAN [3] и CSE [1].

2.1. Описание эксперимента TOSQAN

TOSQAN – это экспериментальная программа, осуществляемая Институтом ядерной и радиационной безопасности Франции (IRSN) для проведения термогидравлических исследований защитной оболочки. Установка TOSQAN представляет собой большой корпус, предназначенный для моделирования типичных аварийных условий теплогидравлического потока в защитной оболочке ядерного реактора с водой под давлением (PWR).

Установка TOSQAN – закрытый цилиндрический объем, в который подается пар и аэрозольные частицы (рис. 1). Пар подавался с помощью вертикальной трубы, находящейся в центральной части цилиндрического объема установки, создавая тем самым избыточное давление в объеме. В верхней части экспериментальной установки находятся спринклеры и система подачи аэрозолей. В качестве аэрозолей использовались частицы карбида кремния (SiC) с плотностью $3,2 \text{ г/см}^3$. Температура атмосферы определялась с помощью термодатчиков, распределенных в разных областях экспериментальной установки по высоте. Концентрация аэрозолей в объеме экспериментальной установки определялась с помощью гранулометра WELAS. Для определения массы аэрозолей, собранной каплями воды, использовался мутномер (турбидиметр). Интерферометрическая лазерная визуализация для определения размера капель (ILIDS) позволила определить размер капель спринклерной системы. Численные характеристики эксперимента TOSQAN представлены ниже.

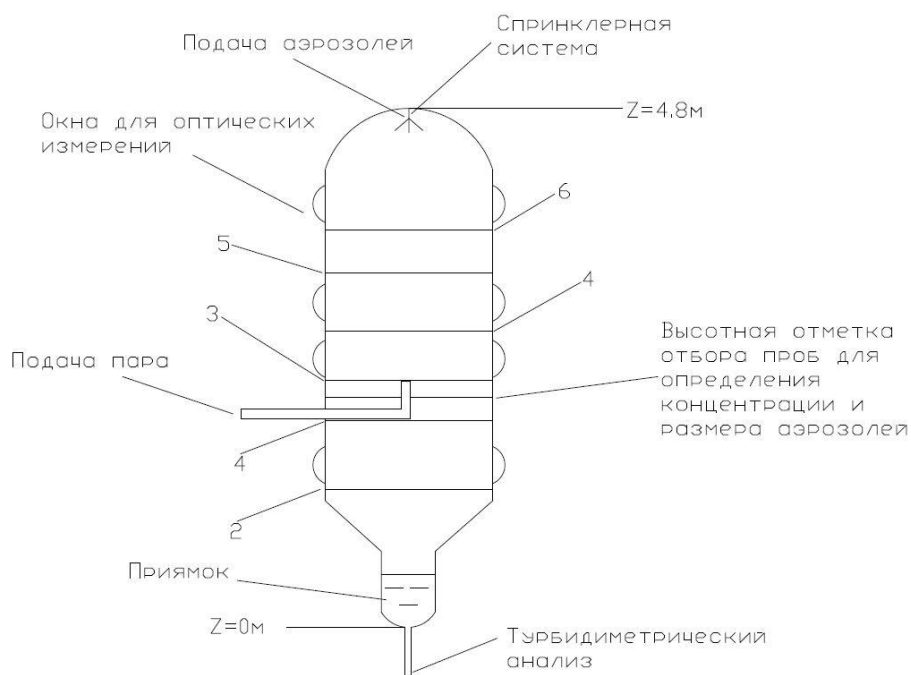


Рис. 1. Схема экспериментальной установки TOSQAN

Основные характеристики эксперимента TOSQAN

Объем экспериментального объема	7 м ³
Высота падения капли	4 м
Масса аэрозоля	1500 мг
Средний диаметр аэрозольной частицы	1,11 мкм
Средний диаметр капли спринклерной системы	146 мкм
Расход спринклерной системы	30·10 ⁻⁶ м ³ /с
Атмосфера	Пар+воздух

Важно отметить, что в момент включения спринклеров, масса аэрозоля в атмосфере равна 1238 мг, это меньше, чем масса аэрозоля, поданная в объем. Авторы работы [3] поясняют такое различие тем, что какая-то часть аэрозолей осела на стены до активации спринклеров.

2.2. Описание эксперимента CSE

Восемь крупномасштабных экспериментов со спринклерами были проведены в экспериментальной установке программы CSE, имитирующей защитную оболочку, объемом 751 кубических метров (эксперименты A-3, A-4, A-6, A-7, A-8, A-9, A-10 и A-12). Целью экспериментов CSE было изучить влияние спринклерной системы на выведение радиоактивных ПД из защитной оболочки. Для моделирования был выбран тест A-10 как наиболее представительный с точки зрения полноты исходных данных. Установка CSE состоит из трех связанных зон разного объема: объем основного помещения вместе с помещением сухого бокса (в дальнейшем объем «главного» помещения), объем «среднего» помещения и объем «нижнего» помещения. Подача ПД осуществлялась в объеме «главного» помещения. Схема установки представлена на рис. 2.

Методика эксперимента CSE заключалась в моделировании условий, возникающих при авариях с перегревом топлива. В паровоздушную атмосферу экспериментальной установки через объем «главного» помещения поступал водяной пар до тех пор, пока не будут достигнуты уставки по температуре и давлению, равные 394,3 K (250 °F) и 3,38 бар (49 psia) соответственно. После этого включалась спринклерная система и начиналась подача ПД. В качестве ПД в эксперименте использовались аэрозоли цезия, урана, йода, а также молекулярный йод и органический йод. В настоящей работе рассмотрены только аэрозоли цезия. В момент времени 2400 секунд прекращалась подача свежей воды спринклерной системы, а затем в 3000 секунд начиналась рециркуляция воды в спринклерную систему из приемка.

Концентрация ПД в атмосфере экспериментальной установки определялась с помощью системы фильтров, расположенных в 14 различных местах по объему установки. Аэрозольные частицы улавливались входным фильтром; молекулярный йод улавливался серебряным экраном и серебряной мембраной фильтра; молекулярный йод и летучие формы неорганического йода, которые не улавливались с помощью серебра, улавливались компонентом с угольной бумагой; органические соединения йода (йодистый метил) захватывались областью с угольным фильтром. Размер аэрозолей

измерялся с помощью каскадного импактора. Численные характеристики эксперимента CSE представлены ниже.

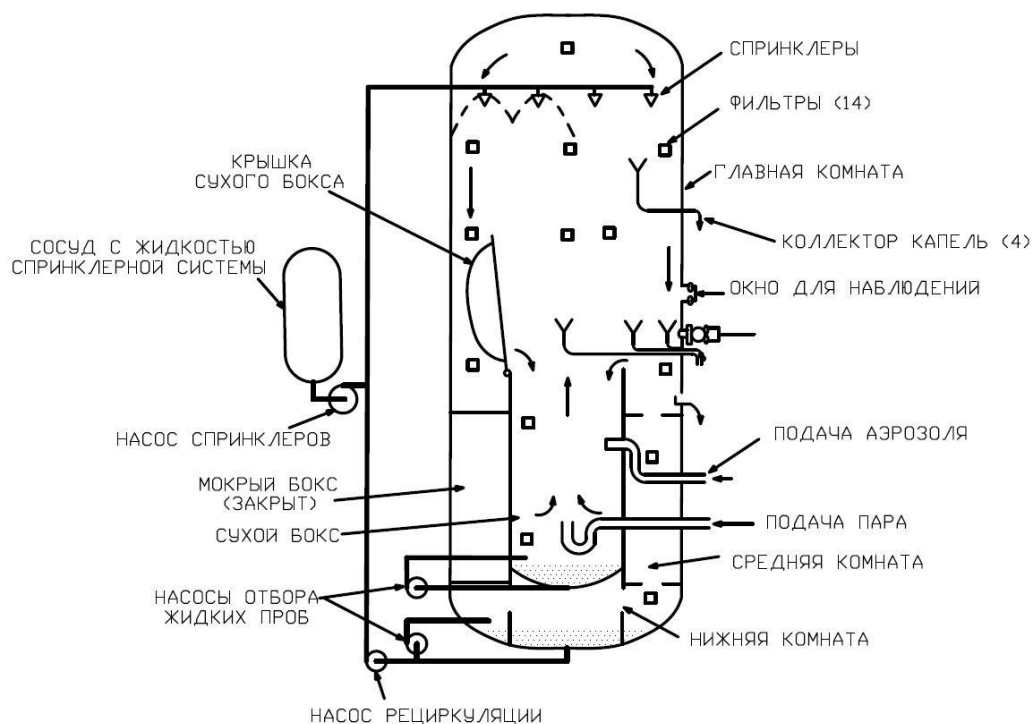


Рис. 2. Схема экспериментальной установки CSE

Основные характеристики эксперимента CSE

Высота падения капли	15,4 м
Масса аэрозоля	0,3 г
Расход спринклерной системы	0,0037 м ³ /с
Температура воды спринклерной системы	293 К
Размер капли	1210 мкм
Размер аэрозолей	0,4 мкм
Атмосфера	Пар+воздух

2.3. Результаты расчета и сравнение с экспериментом

Сравнение результатов расчета динамики изменения массы аэрозоля в атмосфере с экспериментом приведено на рис. 3 и 4.

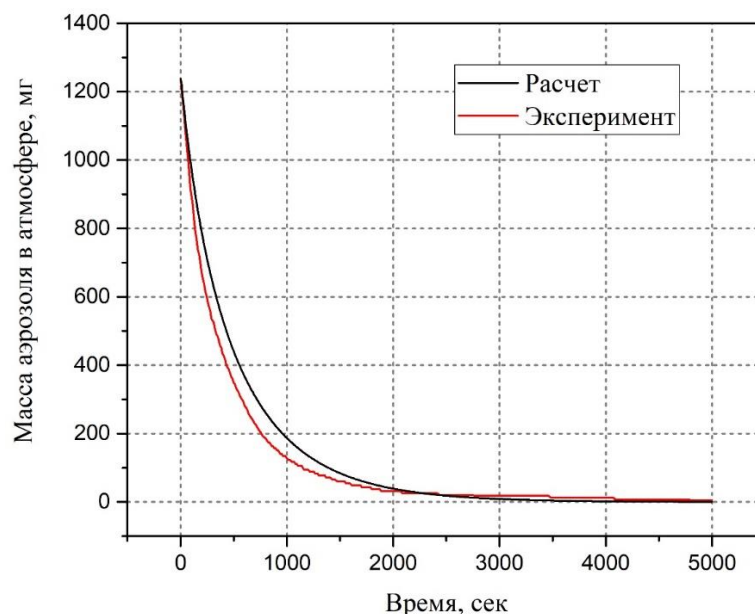


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных массы аэрозоля в атмосфере в эксперименте TOSQAN

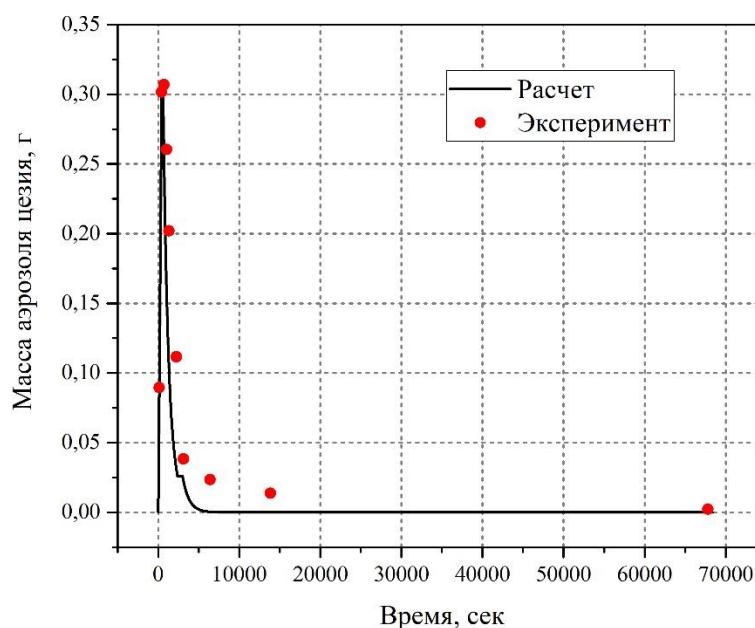


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных массы аэрозоля цезия в атмосфере в эксперименте CSE

3. Анализ влияния плотности аэрозолей на выведение за счет спринклерной системы

Плотность, наряду с распределением аэрозолей по размерам, является важным параметром при рассмотрении переноса аэрозолей. Поскольку состав радиоактивных аэрозолей напрямую зависит от сценария аварии, плотность аэрозольных частиц для разных аварий также может отличаться. В экспериментах серии Phebus-FP, посвященных исследованию образования и переноса аэрозолей в условиях тяжелой аварии, проведена оценка плотности аэрозольных частиц. Так, согласно работе [4], плотность аэрозольных частиц оценена в 3000 кг/м^3 . Необходимо подчеркнуть, что аэрозоли SiC в эксперименте TOSQAN имели плотность 3200 кг/м^3 .

В связи с этим была проведена серия расчетов с целью выявления влияния плотности аэрозолей на скорость их выведения из атмосферы 3О при работе спринклерной системы. В качестве распределения аэрозолей по размерам использовалось распределение из эксперимента FPT-3. Параметры распределения представлены ниже (рис. 5). Кроме того, в аналитических расчетах в качестве массы аэрозоля и геометрических характеристик объема использовались данные из эксперимента TOSQAN. В качестве плотности аэрозолей в аналитических расчетах использовалась плотность частиц SiC из эксперимента TOSQAN. При этом плотность аэрозолей варьировалась таким образом, чтобы получить «коридор» $\pm 50\%$ по значению плотности, т.е. в итоге получались три расчета с разными значениями плотности: 1600, 3200 и 4800 кг/м³. Результаты расчета представлены на рис.6

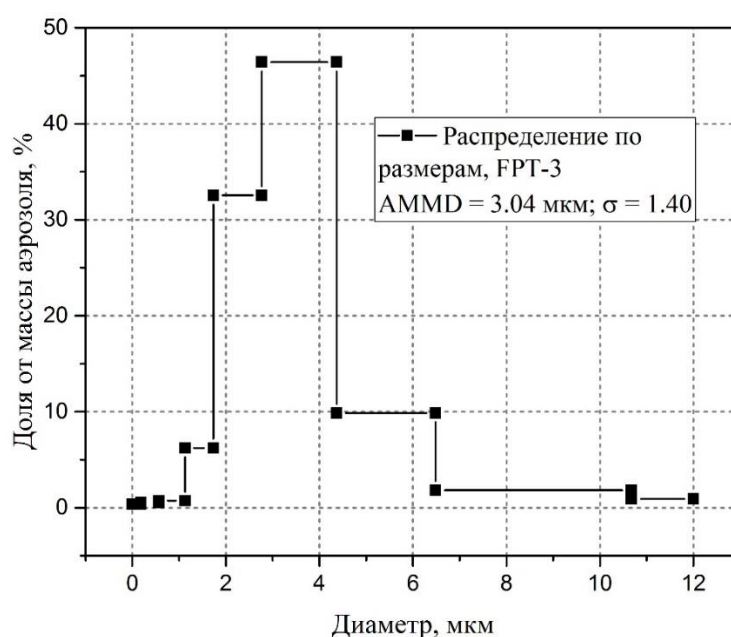


Рис. 5. Распределение аэрозолей по размерам в эксперименте FPT-3

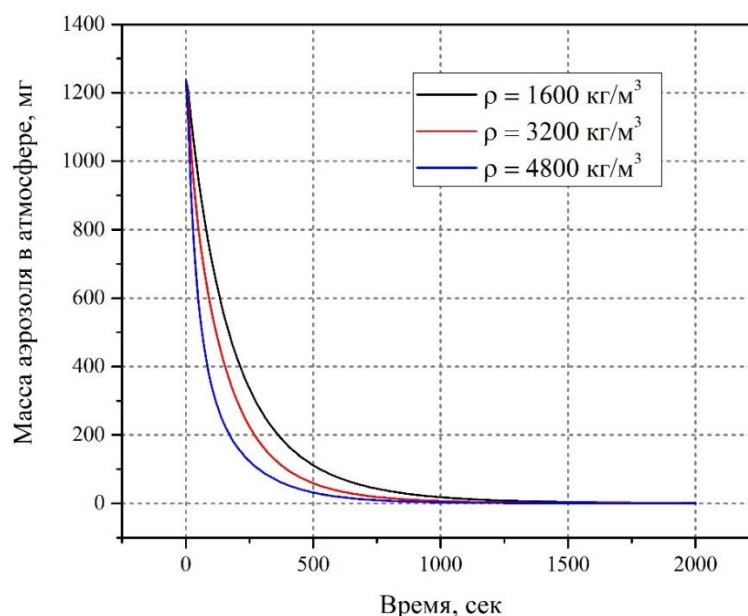


Рис. 6. Влияние плотности на содержание аэрозолей в атмосфере

По результатам расчета увеличение плотности аэрозолей ведет к большему выведению аэрозолей из атмосферы экспериментального объема. Так, например, для момента времени 280 секунд имеем три значения массы аэрозоля в атмосфере: 290,6 мг, 188,6 и 103,7 соответственно для плотности 1600, 3200 и 4800 кг/м³.

Заключение

В настоящей работе был проведен анализ выведения радиоактивных ПД из атмосферы защитной оболочки при работе спринклерной системы на примере моделирования эксперимента TOSQAN и эксперимента CSE с учетом возможных механизмов захвата аэрозольных частиц каплями спринклерной системы. Анализ полученных результатов продемонстрировал хорошую качественную и количественную сходимость расчетных и экспериментальных данных. Кроме того, проведены варианты расчеты по изучению влияния плотности аэрозолей на их выведение за счет спринклерной системы. Согласно результатам расчета, заметно влияние плотности на выведение аэрозолей из атмосферы при работе спринклерной системы: увеличение плотности аэрозолей ведет к снижению массы аэрозолей в атмосфере вследствие большего осаждения за счет механизма гравитационного осаждения.

Список литературы

1. A. K. Postma and L. F. Coleman. "Effect of Continuous Spray Operation on the Removal of Aerosols and Gases in the Containment System Experiment". BWL-1485, Battelle-Northwest (December 1970).
2. Шмельков Ю.Б., Звонарев Ю.А., Петров Л.В., Шутов Н.В. Разработка и верификация кода МАВР-ТА для моделирования выхода продуктов деления и их переноса под защитной оболочкой при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР // Вестник атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. Выпуск 5. С. 92–104.
3. E. Porcheron, P. Lemaitre, D. Marchand, W. Plumecocq, A. Nuboer, J. Vendel, "Experimental and numerical approaches of aerosol removal in spray conditions for containment application". Nuclear Engineering and Design, 240 (2010), 336–343.
4. A. Kontautas, E. Babilas, E. Urbonavicius. COCSYS analysis for deposition of aerosols and fission products in PHEBUS FPT-2 containment. Nuclear Engineering and Design, 247 (2012), 160–167.