

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫВЕДЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ ИЗ АТМОСФЕРЫ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС С ПОМОЩЬЮ СПРИНКЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ

© 2022 г. С. С. Савекин^а, *, Ю. Б. Шмельков^а

^а НИЦ “Курчатовский институт”, пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, 123182 Россия

*e-mail: starsavrus@gmail.com

Поступила в редакцию 26.05.2021 г.

После доработки 21.06.2021 г.

Принята к публикации 23.06.2021 г.

В ходе запроектных аварий на атомной электростанции (АЭС) радиоактивные продукты деления поступают в атмосферу защитной оболочки и далее через неплотности и систему вентиляции выбрасываются в окружающую среду. Выброс радиоактивных веществ – это один из ключевых факторов, определяющих радиационные последствия аварии и, как следствие, безопасность АЭС. В рамках концепции управления запроектными авариями на АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) спринклерная система является одной из систем безопасности, применяемых в том числе для смягчения последствий запроектных аварий при выбросе радиоактивных продуктов деления (ПД). Основными функциями спринклерной системы являются снижение давления среды в зоне локализации аварии и отвод тепла из нее, уменьшение концентрации радиоактивных веществ (йода в молекулярной и органической формах и аэрозольных частиц) в помещениях зоны локализации аварии. Таким образом, описание процесса выведения радиоактивных продуктов деления из атмосферы защитной оболочки АЭС становится важной задачей при численном моделировании запроектных аварий. В настоящей работе представлены модели основных механизмов выведения аэрозольных частиц из атмосферы защитной оболочки каплями воды спринклерной системы, а также результаты валидации данных моделей на экспериментах TOSQAN и CSE с помощью кодов ИРКА и МАВР-ТА, разработанных в НИЦ “Курчатовский институт”.

Ключевые слова: продукты деления, аэрозоли, запроектные аварии, спринклерная система, аварийная ситуация, управление авариями, системы безопасности АЭС, защитная оболочка

DOI: 10.1134/S0040363622020059

Основа безопасности атомных электростанций – предотвращение возникновения аварийных ситуаций в процессе эксплуатации. Если аварийная ситуация произошла, то смягчение ее последствий осуществляется применением процедур управления авариями и работой систем безопасности АЭС. При авариях радиоактивные ПД поступают в атмосферу защитной оболочки в газообразной форме (радиоактивные благородные газы и органические соединения йода, преимущественно йодистый метил), в виде неорганических соединений йода (главным образом молекулярный йод) и аэрозолей. Цель настоящей работы – демонстрация подхода к моделированию улавливания аэрозолей ПД каплями спринклерной системы в условиях, характерных для запроектной аварии на АЭС с ВВЭР [1].

Согласно [2] снижение массы или активности аэрозольных частиц в атмосфере защитной оболочки АЭС при работе спринклерной системы характеризуется скоростью выведения λ , которая в

данном случае задается как доля объема защитной оболочки, омываемого каплями при распылении, умноженная на суммарную эффективность выведения. Если распределение капель по объему защитной оболочки считать равномерным и не учитывать изменение размера капли при ее падении, выражение для скорости выведения можно записать в виде

$$\lambda = \frac{3QhE}{2DV}, \quad (1)$$

где Q – объемный расход воды спринклерной системы, м³/с; h – высота падения капли, м; E – эффективность улавливания аэрозолей; D – диаметр капли, м; V – объем защитной оболочки, м³.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

Эффективность улавливания аэрозолей E согласно [2] определяется как вероятность захвата каплей частицы, находящейся в точке, где такой

захват возможен, а математически – как число частиц, захваченных каплей, деленное на число частиц, находящихся в омываемом каплей объеме в течение ее падения.

Захват аэрозольной частицы каплями спринклерной системы является достаточно сложным процессом и зависит от различных механизмов. Суммарную эффективность улавливания при работе спринклерной системы в защитной оболочке АЭС можно определить следующим образом:

$$E = 1 - (1 - E_{inert})(1 - E_{inter}) \times (1 - E_{BrDiff})(1 - E_{Diff}), \quad (2)$$

где E_{inert} , E_{inter} , E_{BrDiff} , E_{Diff} – эффективность улавливания за счет инерционного взаимодействия частицы с каплей, перехвата частицы каплей, броуновской диффузии и диффузиофореза.

Кроме описанных выше процессов также возможно улавливание аэрозолей каплями спринклерной системы за счет термофореза, при котором температурные градиенты вызывают движение аэрозольных частиц к поверхностям конденсации. Однако для типичных атмосферных условий в защитной оболочке при запроектной аварии (насыщенная парогазовая смесь) термофорез будет незначительным по сравнению с остальными механизмами, поэтому им можно пренебречь [3].

Инерционное взаимодействие частицы с каплей. Вблизи капли линии тока парогазовой смеси в атмосфере защитной оболочки искривляются, огибая препятствие, т.е. каплю. Крупные и тяжелые частицы вследствие своей инерции выходят из парогазового потока, сталкиваются с каплей и осаждаются в ней. Согласно работе [4], инерционное взаимодействие происходит в основном с частицами диаметром более 5 мкм. Формализованное описание инерционного взаимодействия представлено в работах [3, 4] и выглядит следующим образом:

$$E_{inert} = \frac{E(viscous) + Re E(potential)/60}{1 + Re/60},$$

где

$$E(viscous) = \begin{cases} 0 & \text{при } Stk \leq 1.214, \\ \frac{1}{\left[1 + \frac{0.75 \ln(2Stk)}{Stk - 1.214}\right]^2} & \text{при } Stk > 1.214 \end{cases}$$

– эффективность инерционного взаимодействия при вязкостном течении парогазовой смеси;

$$E(potential) = \begin{cases} 0 & \text{при } Stk \leq 0.0833; \\ \left(\frac{Stk}{Stk + \delta}\right)^2 & \text{при } Stk \geq 0.2; \\ 8.57 \left(\frac{Stk}{Stk + \delta}\right)^2 (Stk - 0.08336) & \text{при } 0.0833 < Stk < 0.2 \end{cases}$$

– эффективность инерционного взаимодействия при потенциальном течении парогазовой смеси;

Re – число Рейнольдса; $Stk = \frac{d^2 \rho_g U}{9 \mu_g D \chi}$ – число Стокса; d – диаметр аэрозольной частицы, м; ρ_g – плотность среды, кг/м³; U – скорость падения капли, м/с; μ_g – динамический коэффициент вязкости среды, Па · с; χ – динамический фактор формы для аэрозольной частицы; $\delta = 0.25-0.75$ – константа неопределенности.

Скорость капли в работах [4, 5] предлагается вычислять с помощью числа Рейнольдса и числа Бэста N:

$$\ln Re = -3.126 + 1.01 \ln N - 0.01912 (\ln N)^2;$$

$$Re = \frac{\rho_g U D}{\mu_g}; \quad N = \frac{4 \rho_g (\rho_l - \rho_g) g D^3}{3 \mu_g^2},$$

где ρ_l – плотность воды спринклерной системы, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м²/с.

Броуновская диффузия. Самые мелкие частицы диаметром менее 0.1 мкм обладают небольшой массой и постоянно находятся в броуновском движении, траектории которого постоянно колеблются относительно линии тока парогазовой смеси в атмосфере защитной оболочки. При колебаниях частицы выходят из потока, касаются капли, которая захватывает их. Математическое описание этого процесса представлено в работах [4, 5] в виде

$$E_{BrDiff} = \frac{4}{Pe} (2 + 0.557 Re^{1/2} Sc^{3/8}),$$

где $Pe = Sc Re$ – число Пекле; $Sc = \frac{3 \pi \mu_g^2 d}{Cn \rho_g k T}$ –

число Шмидта; $Cn = 1 + Kn \left[1.37 + 0.4e^{-\frac{1.1}{Kn}}\right]$ – па-

раметр Каннингэма для аэрозолей; $Kn = \frac{2 \lambda_f}{d}$ – число Кнудсена; λ_f – длина свободного пробега в среде, м; T – температура атмосферы, К; k – постоянная Больцмана, Дж/К.

Перехват частицы каплей. Частицы среднего размера (0.5–2.0 мкм) не обладают достаточной инерцией для того, чтобы выйти из парогазового потока и попасть в каплю, при этом броуновская

диффузия работает уже слабо, так как колебания траекторий частиц относительно линии тока не такие сильные. Поэтому такие частицы с большей вероятностью остаются в потоке и огибают капли вместе с парогазовой смесью. Перехват частицы происходит тогда, когда она приближается к поверхности капли на расстояние своего радиуса. Такого касания достаточно для ее захвата каплей. Математическое описание этого процесса представлено в работах [4, 5]:

$$E_{inter} = \frac{\Psi(viscous) + Re \Psi(potential)/60}{1 + Re/60},$$

где

$$\Psi(viscous) = (1 + I)^2 \left[1 - \frac{1.5}{1 + I} + \frac{0.5}{(1 + I)^2} \right]$$

– эффективность перехвата частицы при вязкостном течении парогазовой смеси; $\Psi(potential) = 3I$; $I = \gamma \frac{d}{D}$; γ – фактор формы столкновения для аэрозольной частицы.

Диффузиофорез. При диффузиофорезе аэрозольные частицы попадают на капли спринклеров вследствие конденсации пара на них. Эффективность этого процесса, согласно [3], определяется следующим образом:

$$E_{Diff} = \frac{(1 + \sigma_{12} x_{air}) \rho_l D c_{p,l} \Delta T}{3 C_g h r_{steam}},$$

где σ_{12} – коэффициент проскальзывания (функция плотности среды и плотности жидкости каплей спринклерной системы [3]); x_{air} – мольная доля воздуха в атмосфере; $c_{p,l}$ – теплоемкость жидкости в капле, Дж/(кг · К); ΔT – градиент температуры между каплей и атмосферой защитной оболочки, К; C_g – объемная массовая концентрация пара в защитной оболочке, кг/м³; r_{steam} – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Модели для эффективностей в формуле (2) реализованы в составе программных средств МАВР-ТА [6] и ИРКА [7], которые отображают похожие физические модели в части переноса продуктов деления в защитной оболочке для анализа безопасности в различных аварийных режимах. Программное средство МАВР-ТА предназначено для моделирования выхода ПД из топлива и устройства локализации расплава и переноса ПД в I контуре и защитной оболочке, а также для определения выброса ПД в окружающую среду при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР, средство ИРКА – для моделирования переноса ПД в защитной оболочке и определения выброса ПД в

окружающую среду при проектных и запроектных авариях без плавления топлива.

ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ СПРИНКЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ TOSQAN

TOSQAN – это экспериментальная программа, осуществляемая Институтом ядерной и радиационной безопасности Франции (IRSN) для проведения термогидравлических исследований при моделировании типичных аварийных условий в защитной оболочке ядерного реактора с водой под давлением (PWR) [8].

Основной рабочий объем экспериментальной установки TOSQAN расположен в закрытом цилиндрическом сосуде длиной 4.8 м, в который подается пар и аэрозольные частицы (рис. 1). Пар поступает по вертикальной трубе, находящейся в центральной части установки. В верхней части находятся спринклеры и система подачи аэрозолей. В качестве аэрозолей использовали частицы карбида кремния (SiC) разного размера плотностью 3.2 г/см³. Температуру атмосферы измеряли с помощью термопар, размещенных в разных областях экспериментальной установки по высоте, концентрацию аэрозолей – с помощью гранулометра WELAS. Для определения массы аэрозолей, собранной каплями воды, использовали мутномер (турбидиметр). Интерферометрическая ла-

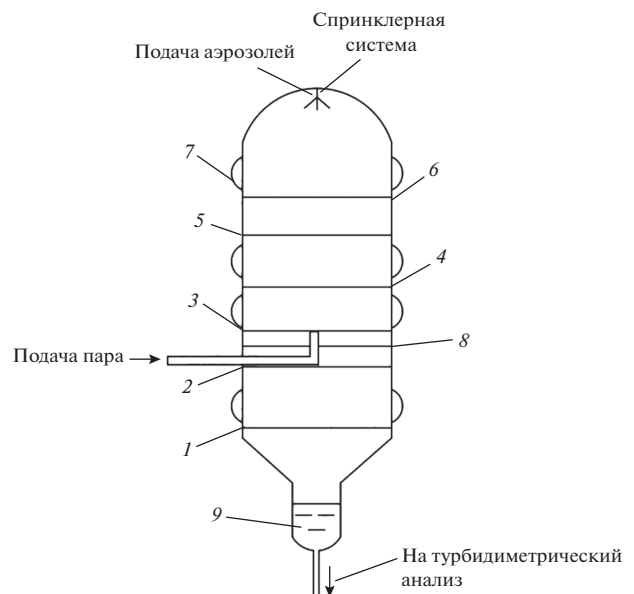


Рис. 1. Схема экспериментальной установки TOSQAN. 1–6 – место установки термопары; 7 – окна для оптических измерений; 8 – отметка отбора проб для определения концентрации и размера частиц аэрозолей; 9 – приемок

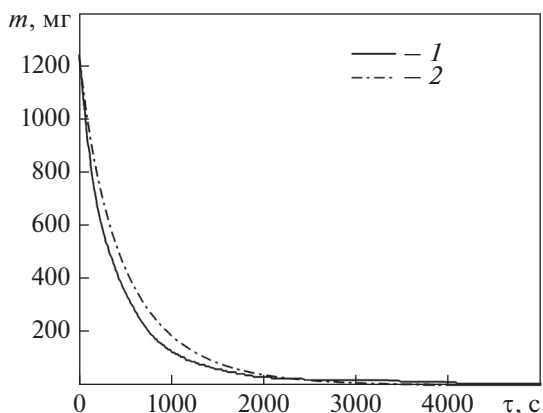


Рис. 2. Зависимость экспериментальной (1) и расчетной (2) массы аэрозоля SiC *m* в атмосфере установки TOSQAN от продолжительности эксперимента τ

зерная визуализация (ILIDS) позволила установить размер капель спринклерной системы. Основные характеристики эксперимента TOSQAN представлены далее:

Объем экспериментальной установки, м ³	7
Высота падения капли, м	4
Масса аэрозоля, используемая в расчете, мг	1238
Температура воды спринклерной системы, К	293
Средний диаметр, мкм:	
аэрозольной частицы	1.11
капли спринклерной системы	146
Расход воды спринклерной системы, м ³ /с	30×10^{-6}
Атмосфера	Пар + воздух

В момент включения спринклеров масса аэрозоля в атмосфере *m*, согласно [8], составляла 1238 мг, это меньше, чем полная масса аэрозоля, равная 1500 мг, которую подавали в объем. Авторы работы [8] объясняют такое различие тем, что какая-то часть аэрозолей осела на стены до активации спринклеров.

Результат моделирования эксперимента TOSQAN с помощью кодов ИРКА и МАВР-ТА представлен на рис. 2. Кроме данных по массе аэрозоля SiC в атмосфере экспериментальной установки в работе [8] также имеются экспериментальные данные распределения аэрозолей SiC по размерам в разные моменты времени. Расчетные и экспериментальные данные распределения аэрозолей по размерам приведены на рис. 3.

Погрешность измерения массы аэрозоля в атмосфере, согласно [8], равна 7%. Для эксперимента TOSQAN был выполнен анализ неопре-

деленности в соответствии с методикой, представленной в [9]. Указанная погрешность учитывает неопределенность, связанную с пространственной дискретизацией и численными методами, а также неопределенности входных данных расчетов и измерений. Результат анализа неопределенности — количественная оценка среднего отклонения данных расчетов от соответствующих экспериментальных значений и оценка стандартной неопределенности верификации. Для каждого эксперимента выполняли 200 расчетов, что, согласно формуле Вилкса, соответствует высокой степени достоверности полученных результатов. Итоговая погрешность определения массы аэрозоля SiC в атмосфере экспериментальной установки с учетом неопределенности составила $2.87 \pm 1.13\%$ массы источника.

ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ УЛАВЛИВАНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CSE

На экспериментальной установке объемом 751 м³, имитирующей защитную оболочку, были проведены восемь крупномасштабных экспериментов со спринклерами по программе CSE. Цель экспериментов CSE заключалась в изучении влияния спринклерной системы на выведение радиоактивных ПД из защитной оболочки. Для моделирования был выбран тест А-10 как наиболее представительный с точки зрения полноты исходных данных. Все приведенные далее данные получены из работ [3, 10].

Установка CSE состоит из трех связанных зон разного объема: основного помещения вместе с сухим боксом (в дальнейшем главное помещение), среднего и нижнего помещений. Подача ПД осуществлялась в объеме главного помещения. Схема установки показана на рис. 4. Объемы помещений, м³, составляют: главного — 596, среднего — 59, нижнего — 96. Основные характеристики эксперимента представлены далее:

Высота падения капли, м	15.4
Масса аэрозоля, используемая в расчете, г	0.3
Расход воды спринклерной системы, м ³ /с	0.0037
Температура воды спринклерной системы, К	293
Средний диаметр, мкм:	
аэрозольной частицы	0.4
капли спринклерной системы	1210
Атмосфера	Пар + воздух

Методика эксперимента CSE заключалась в моделировании условий, возникающих при авариях с перегревом топлива. В паровоздушную ат-

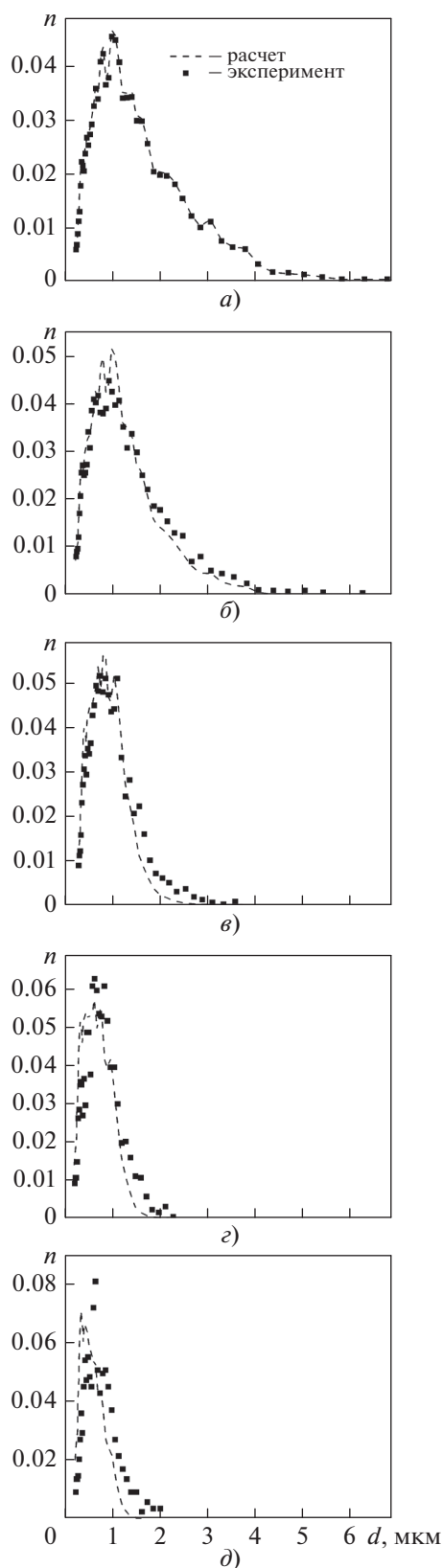


Рис. 3. Зависимость доли аэрозолей SiC n от их диаметра d .
 τ , с: а – 0; б – 200; в – 1000; г – 2000; д – 4000

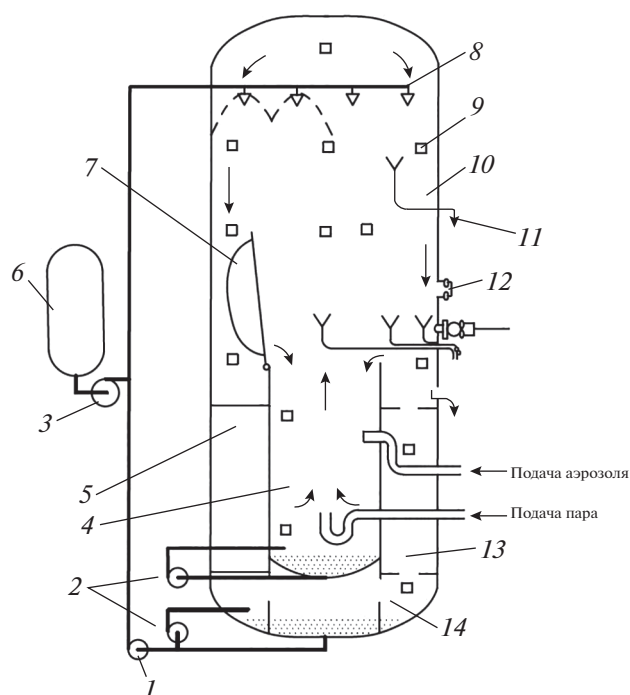


Рис. 4. Схема экспериментальной установки CSE.
 1, 2, 3 – насосы рециркуляции, отбора жидких проб и спринклеров; 4, 5 – сухой и мокрый боксы; 6 – сосуд с жидкостью спринклерной системы; 7 – крышка сухого бокса; 8 – спринклеры; 9 – фильтры; 10, 13, 14 – главное, среднее и нижнее помещения; 11 – коллектор капель; 12 – окно для наблюдений

мосферу главного помещения поступал водяной пар до тех пор, пока не достигались уставки по температуре 394.3 К и давлению 0.338 МПа. После этого включалась спринклерная система и начиналась подача продуктов деления – аэрозолей цезия, урана, йода, а также молекулярного и органического йода. В настоящей работе рассмотрены только аэрозоли цезия. В момент времени 2400 с от начала эксперимента прекращалась подача свежей воды спринклерной системы, а затем с 3000-й секунды начиналась рециркуляция воды в спринклерную систему из приемка.

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

Авторы работы [3] иллюстрируют возможные неточности, которые сопровождали эксперимент.

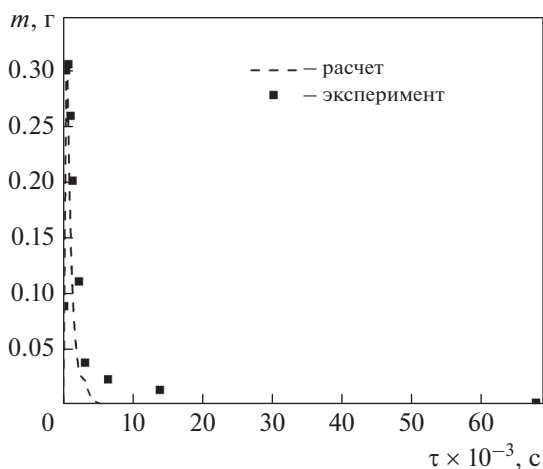


Рис. 5. Зависимость экспериментальной (1) и расчетной (2) массы аэрозоля цезия в атмосфере установки CSE от продолжительности эксперимента

Так, измеренный каскадным импактором размер частиц аэрозолей намного меньше, чем их реальный размер в установке. В [3] представлен теоретический расчет, согласно которому вымывание для цезия намного меньше, чем в эксперименте (т.е. концентрация аэрозоля цезия в теоретическом расчете выше, чем ее экспериментальные значения). Представленное в эксперименте вымывание цезия, согласно данным авторов, соответствует размеру частиц аэрозолей 3.5 мкм, однако для расчета использовали значение, полученное с помощью каскадного импактора, т.е. 0.4 мкм. Авторы допускают, что аэрозоли цезия могли частично осесть в канале их подачи из-за возможной конденсации пара. На рис. 5 для сравнения показаны экспериментальные и рассчитанные по кодам ИРКА и МАВР-ТА данные зависимости массы аэрозолей цезия от продолжительности эксперимента.

Погрешность результатов измерения составляет 10% согласно [10]. Для эксперимента CSE был выполнен анализ неопределенности в соответствии с методикой, представленной в [9]. Погрешность определения массы аэрозоля цезия в атмосфере экспериментальной установки с учетом неопределенности составила $25.58 \pm 9.67\%$ массы источника.

ВЫВОДЫ

1. Представленная модель расчета эффективности захвата аэрозольных частиц каплями спринклерной системы обеспечивает приемлемые качественные и количественные сходности расчетных данных с экспериментальными.

2. При моделировании эксперимента TOSQAN на участке до примерно 2000-й секунды наибольшее отклонение расчета от эксперимента составляет 52%, что удовлетворяет принципу консерва-

тизма для выброса продуктов деления в окружающую среду. После 2000-й секунды наибольшее отклонение составляет 91%, что связано с неточностью оцифровки экспериментальной кривой ввиду малого масштаба исходного графика и отсутствия доступа к оригинальным экспериментальным данным. Обеспечиваются приемлемые качественные и количественная сходности расчетных и экспериментальных результатов по изменению во времени распределения частиц аэрозолей по размерам.

3. При моделировании эксперимента CSE наибольшее отклонение составляет 72%, что обусловлено высокой неопределенностью ключевых экспериментальных параметров.

4. Предлагаемая модель может применяться при обосновании эффективности мер по управлению запроектными авариями на АЭС для уменьшения или смягчения выброса радиоактивных продуктов деления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **НП-010-16.** Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций. М.: НТЦ ЯРБ, 2016.
2. **Parsly L.F.** Removal of radioactive particles by sprays. ORNL-4671. 1971.
3. **Postma A.K., Coleman L.F.** Effect of continuous spray operation on the removal of aerosols and gases in the containment system experiment. BNWL-1485. Battelle-Northwest, Dec. 1970.
4. **State-of-the-art report on nuclear aerosols / H.J. Allelein, A. Auvinen, J. Ball, S. Güntay, L.E. Herranz, A. Hidaka, A.V. Jones, M. Kissane, D. Powers, G. Weber.** NEA/CSNI/5. 2009.
5. **Powers D.A., Burson S.B.** A simplified model of aerosol removal by containment spray. NUREG/CR-5966. 1993.
6. **Разработка** и верификация кода МАВР-ТА для моделирования выхода продуктов деления и их переноса под защитной оболочкой при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР / Ю.Б. Шмельков, Ю.А. Звонарев, Л.В. Петров, Н.В. Шутов // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2018. № 5. С. 92–104.
7. **ИРКА.** Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019666574. Правообладатель НИЦ «Курчатовский институт», 2019.
8. **Experimental** and numerical approaches of aerosol removal in spray conditions for containment application / E. Porcheron, P. Lemaitre, D. Marchand, W. Plumecocq, A. Nuboer, J. Vendel // Nucl. Eng. Des. 2010. V. 240. P. 336–343.
9. **РБ-166-20.** Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2020.
10. **Removal** of iodine and particles by sprays in the containment systems experiment / R.K. Hilliard, A.K. Postma, J.D. McCormack, L.F. Coleman // Nucl. Technol. 1971. V. 10. № 4. P. 499–519.

Simulation of Aerosol Removal from the Atmosphere of an NPP Containment using a Sprinkler System

C. C. Savekin^{a, *} and Yu. B. Shmelkov^a

^a National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: starsavrus@gmail.com

Abstract—In the course of accidents at a nuclear power plant (NPP) beyond the design basis, radioactive fission products enter the atmosphere of the containment shell and then are released into the environment through leaks and the ventilation system. The release of radioactive substances is one of the key factors that determine the radiation consequences of an accident and, as a consequence, the safety of a nuclear power plant. Within the framework of the concept of managing beyond design basis accidents at NPPs with a pressurized water reactor (VVER), a sprinkler system is one of the safety systems used, among other things, to mitigate the consequences of beyond design basis accidents when radioactive fission products (FP) are released. The main functions of the sprinkler system are to reduce the pressure of the environment in the accident localization zone and remove heat from it and to reduce the concentration of radioactive substances (iodine in molecular and organic forms and aerosol particles) in the premises of the accident localization zone. Thus, the description of the process of removing radioactive fission products from the atmosphere of the containment shell of a nuclear power plant becomes an important task in the numerical modeling of beyond design basis accidents. This paper presents models of the main mechanisms for removing aerosol particles from the atmosphere of the containment by water droplets of a sprinkler system as well as the results of validation of these models in the TOSQAN and CSE experiments using the IRKA and MAVR-TA codes developed at the Kurchatov Institute.

Keywords: fission products, aerosols, beyond design basis accidents, sprinkler system, emergency, accident management, NPP safety systems, containment