

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ НА ПОВЕДЕНИЕ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АВАРИИ НА АЭС С ВВЭР¹

© 2024 г. С. С. Савекин^а, *, Ю. Б. Шмельков^а

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

*e-mail: starsavrus@gmail.com

Поступила в редакцию 02.10.2023 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Ввиду потенциальной опасности воздействия аэрозольных частиц на организм человека, предельно допустимые концентрации вредных веществ ограничены действующей нормативной документацией. Образование аэрозольных частиц возможно при запроектных авариях на АЭС. Последствия от радиоактивного воздействия радиоактивных аэрозольных частиц, формирующихся при аварии на АЭС, на организм человека существенно более тяжелые, чем от механического воздействия таких частиц. Важной характеристикой радиоактивных аэрозольных частиц является их полидисперсность (неравномерность по размерам), поскольку частицы разного размера при аварии на АЭС имеют различную скорость выведения из атмосферы защитной оболочки АЭС. Таким образом, при рассмотрении движения частиц в защитной оболочке и выброса аэрозольных частиц в окружающую среду важно корректно моделировать распределение аэрозольных частиц по размерам. В настоящей работе представлены результаты расчета счетного и весового распределений аэрозольных частиц по размерам в экспериментах TOSQAN и Phebus-FP. Приведены способы описания полидисперсных систем (использование распределения частиц по размерам или “средних” размеров, характеризующих все распределение), их влияния на процессы, связанные с переносом аэрозольных частиц в защитной оболочке, даны практические рекомендации по работе с распределениями частиц по размерам. Проведено сравнение использования средних характеристик распределения по размерам и логнормального распределения аэрозольных частиц для оценки выброса при гипотетической аварии на АЭС с ВВЭР.

Ключевые слова: реакторная установка, аэродисперсные системы, аэрозольные частицы, распределения по размерам, АЭС, ВВЭР, моделирование аварий, эксперименты TOSQAN и Phebus-FP

DOI: 10.56304/S0040363624700139

Аэрозоли (аэродисперсные системы) представляют собой системы, в которых твердая или жидкая дисперсная фаза находится в газообразной среде. Такие системы встречаются повсеместно. Это частицы пыли, тумана и сигаретного дыма, выбросы металлургических предприятий, угольных электростанций, а также атомных электростанций при возникновении на них аварий.

В общем случае аэрозоли можно разделить на дисперсные и конденсационные [1]. Дисперсные аэрозоли образуются при диспергировании (измельчении, распылении) твердых и жидких тел и при переходе порошкообразных тел во взвешенное состояние под действием потоков, сотрясений и т.п. Примером дисперсных аэрозольных частиц являются капли воды спринклерной системы АЭС [2]. Конденсационные аэрозоли об-

разуются при объемной конденсации паров веществ, например при конденсации паров продуктов деления (ПД) [3]. Дисперсные аэрозоли в большинстве случаев обладают большей полидисперсностью, чем конденсационные, а также состоят из индивидуальных частиц неправильной формы (“обломков”) [1, 4, 5]. В конденсационных аэрозолях твердые частицы зачастую имеют правильную кристаллическую или сферическую форму. Размеры частиц могут находиться в широких пределах: от долей микрометра до десятков микрометров [1, 4, 6, 7]. Так, например, в эксперименте TOSQAN [5], в котором в качестве аэрозольных частиц исследовались частицы карбида кремния (SiC), размеры частиц не превышали 7.5 мкм.

Применительно к авариям на АЭС, которые в зависимости от условий протекания могут сопровождаться не только нарушением герметичности оболочек топлива, но и плавлением самого топлива, наиболее актуальным для моделирования

¹ Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

поведения аэродисперсных систем является режим тяжелой аварии, в котором аэрозоли являются одной из основных форм ПД [8]. Процесс образования радиоактивных аэрозолей начинается с выхода продуктов деления из-под зазора между топливом и оболочкой [2, 9, 10]. Продукты деления в форме паров и газов попадают в объем I контура и по мере движения в контуре конденсируются на микрочастицах топлива и конструкционных материалов. Образовавшиеся аэрозольные частицы, попутно осаждаются в I контуре и коагулируя [11], движутся вместе с несущей средой к месту течи, откуда попадают в защитную оболочку (ЗО) АЭС и в дальнейшем распространяются в ней. Характерные размеры таких аэрозольных частиц, полученные в экспериментах Phebus-FCP [12], не превышают 7 мкм. В работе [13] также исследовался перенос продуктов деления в I контуре с последующим их выходом в объем, моделирующий защитную оболочку. Размеры аэрозольных частиц, образовавшихся при плавлении управляющих стержней, находились в пределах 10 мкм, а размеры частиц, сформировавшихся при плавлении топлива, не превышали 7 мкм.

При исследовании переноса радиоактивных аэрозолей в атмосфере ЗО, где ключевой механизм осаждения частиц – гравитационный, важно учитывать распределение этих частиц по размерам, поскольку от этого зависит оценка количества выбросов в окружающую среду.

Целью настоящей работы являются систематизация подходов к математическому описанию характеристик аэродисперсных систем, валидация этих подходов на экспериментальных данных и получение практических рекомендаций по их применению.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ

Распределение частиц в зависимости от размера (диаметра) может быть выражено несколькими способами [1]. Долю числа частиц, диаметры которых D лежат в пределах $(D, D + dD)$, можно рассчитать по формуле

$$dn = f(D) dD, \tag{1}$$

где $f(D)$ – кривая плотности распределения или дифференциальная кривая счетного распределения.

Для рассматриваемого распределения частиц по размерам должно выполняться условие нормировки

$$\int_0^{\infty} f(D) dD = 1. \tag{2}$$

Отклонение от условия нормировки означает невыполнение условия материального баланса рассматриваемого распределения. Так, если в ка-

честве исходных данных для расчета задано распределение аэрозольных частиц, при котором условие нормировки выполняется на 80%, то, значит, 20% массы аэрозолей не распределено между размерными группами.

Также можно задать весовое распределение частиц, которое выражает долю общей массы всех частиц dg , диаметры которых лежат в пределах $(D, D + dD)$:

$$dg = g(D) dD. \tag{3}$$

Для функции $g(D)$ также справедливо условие нормировки.

Для весовой функции распределения можно записать следующее соотношение [1]:

$$g(D) = \beta m_d f(D), \tag{4}$$

где m_d – масса одной частицы диаметром D ; β – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент β находится путем интегрирования (4) по диаметру частиц

$$\int_0^{\infty} g(D) dD = 1 = \beta \int_0^{\infty} m_d f(D) dD = \beta \bar{M},$$

где \bar{M} – средняя (арифметическая) масса частиц.

Таким образом, дифференциальные функции счетного и весового распределений связаны следующим соотношением:

$$g(D) = \frac{m_d}{M} f(D). \tag{5}$$

Важно отметить, что вид кривой $f(D)$ зависит от процессов формирования распределения частиц по размерам и определяется эмпирическим способом. Для некоторых аэрозолей, к примеру, образованных спорами растений [1], кривые распределения имеют симметричную форму, приближающуюся к кривой Гаусса, соответствующей нормальному распределению:

$$f(D) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(D - \bar{D})^2}{2\sigma^2}\right], \tag{6}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение; \bar{D} – средний диаметр частиц.

Однако для аэрозолей, образующихся при тяжелой аварии на АЭС [8], распределение $f(D)$ отличается от нормального и описывается логнормальной функцией [12]

$$f(D) = \frac{1}{D \ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln d_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g}\right], \tag{7}$$

где d_g – средний геометрический диаметр рассматриваемого распределения; σ_g – стандартное геометрическое отклонение.

На рис. 1 в качестве иллюстрации различий распределений показаны нормальное и логнормальное распределения, рассчитанные на основе данных эксперимента TOSQAN [5] со следующими параметрами: $d_g = 0.9$ мкм, $\sigma_g = 1.94$, $\bar{D} = 1.12$ мкм, $\sigma = 0.8$ мкм.

Как видно на рис. 1, при логнормальном распределении экстремум функции распределения смещается в область меньших диаметров частиц. Согласно имеющимся экспериментальным данным, как было отмечено ранее, распределение аэрозолей ПД по размерам соответствует логнормальному распределению. В соответствии с результатами расчетного моделирования переноса частиц аэрозолей в ЗО, к наиболее тяжелым (консервативным) последствиям аварий на АЭС будет приводить использование именно логнормального распределения, поскольку частицы небольшого размера менее эффективно (по сравнению с крупными частицами) выводятся из атмосферы ЗО из-за гравитации и затрудненности их улавливания спринклерной системой.

Средний геометрический диаметр d_g (счетный медианный диаметр) и стандартное геометрическое отклонение σ_g согласно [14] определяются следующим образом:

$$\ln d_g = \frac{\sum_i (N_i \ln D_i)}{\sum_i N_i}; \quad (8)$$

$$\ln \sigma_g = \left[\frac{\sum_i N_i (\ln d_g - \ln D_i)^2}{\sum_i N_i - 1} \right]^{0.5}, \quad (9)$$

где D_i и N_i — диаметр частиц и число частиц в i -м интервале.

Нельзя не отметить тот факт, что, подобно различным распределениям частиц (счетное, весовое и др.), при описании полидисперсных систем наблюдаются разные характерные средние размеры частиц, что позволяет задать распределение частиц неким одним характерным размером. Так, например, для заданного распределения частиц можно вычислить средний арифметический, средний по поверхности и средний по объему диаметры. В зависимости от решаемой задачи используется тот или иной средний диаметр. Например, если рассматривается какое-либо поверхностное явление, связанное с границей раздела фаз, то следует использовать средний по поверхности диаметр, поскольку на поверхностях аэрозольных частиц могут протекать такие процессы, как горение, адсорбция, а также различные химические реакции. В некоторых случаях, когда среда обладает большой полидисперсностью, использование средних диаметров может

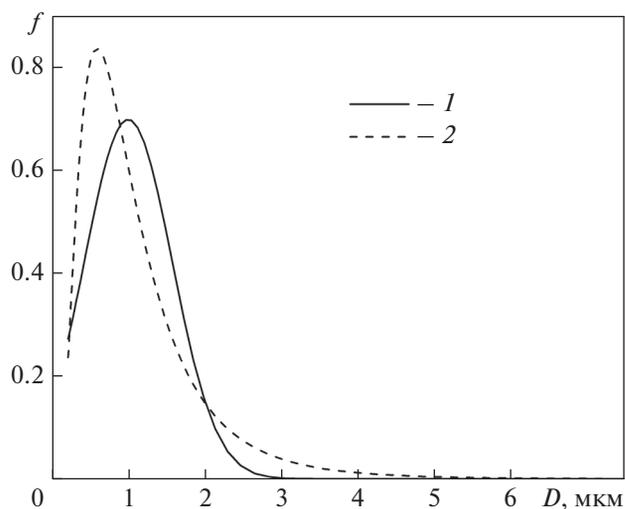


Рис. 1. Нормальное (1) и логнормальное (2) распределения

привести к неудовлетворительному описанию распределения частиц по размерам. При рассмотрении улавливания аэрозольных частиц с помощью капель спринклерной системы АЭС важно понимать, что использование в расчетах среднего арифметического диаметра частиц сужает реальное распределение частиц до одной размерной группы, а это может повлечь за собой некорректное моделирование содержания аэрозольных частиц в атмосфере защитной оболочки.

При расчетах распределений частиц по размерам применяются также специальные “статистические” размеры: массовый и счетный медианный диаметры. Важно отметить, что для логнормального распределения счетный медианный диаметр равен среднему геометрическому диаметру. Соответственно, при использовании логнормальной функции для описания распределения частиц по массе вместо среднего геометрического диаметра в формуле (7) можно применять массовый медианный диаметр, при этом стандартное геометрическое отклонение остается прежним.

Далее рассматривается пример расчета эффективности улавливания при инерционном взаимодействии аэрозольных частиц SiC с каплями воды в эксперименте TOSQAN [5]. Для проведения такого расчета используются среднеарифметический и среднемассовый диаметры, а также распределение частиц по размерам.

Эффективность процесса улавливания частиц, происходящего благодаря инерционному взаимодействию ε_{inert} , определяется следующим образом [15]:

$$\varepsilon_{inert} = \frac{E_{vis} + Re_d E_{pot}/60}{1 + Re_d/60}, \quad (10)$$

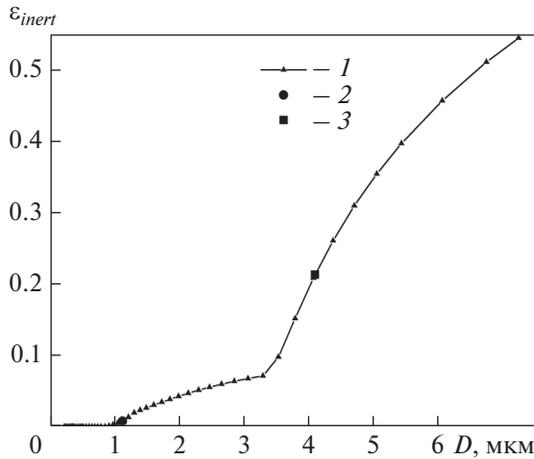


Рис. 2. Результаты расчета эффективности улавливания аэрозольных частиц при инерционном взаимодействии частиц SiC с каплями воды в эксперименте TOSQAN.

1 – распределение частиц по размерам; 2 – при использовании среднеарифметического диаметра частиц; 3 – при использовании среднемассового диаметра частиц

где E_{vis} и E_{pot} – эффективность инерционного взаимодействия частиц с каплями воды при вязкостном и потенциальном течении парогазовой среды; $Re_d = \frac{D_{drop} \rho_g U_t}{\mu_g}$ – число Рейнольдса капли; ρ_g – плотность парогазовой среды; U_t – скорость витания капли; μ_g – динамический коэффициент вязкости среды.

Для расчета используется экспериментальное распределение аэрозолей по размерам, полученное в эксперименте TOSQAN [5]. Средний (средневзвешенный) арифметический диаметр частиц SiC составляет 1.11 мкм, средний (средневзвешенный) массовый диаметр – 4.10 мкм. Эффективность улавливания аэрозолей при инерционном взаимодействии с каплями воды спринклерной системы с использованием среднеарифметического и среднемассового диаметров составляет 7.975×10^{-3} и 0.213 соответственно. Ре-

Таблица 1. Значения коэффициентов b для различных искомых диаметров

Искомая характеристика	Коэффициент b
Счетная мода	-1.0
Диаметр:	
средний арифметический	0.5
среднекубический	1.5
массовый медианный	3.0
массовый средний	3.5

зультаты расчета эффективности улавливания аэрозольных частиц SiC при их инерционном взаимодействии с каплями воды представлены на рис. 2.

Таким образом, сведение полидисперсного распределения частиц по размерам к одному размеру (в данном случае среднему арифметическому и среднемассовому диаметрам) может стать причиной искажения картины улавливания частиц. При моделировании работы спринклерной системы в условиях аварии на АЭС использование вместо распределения частиц по размерам среднего диаметра может привести как к снижению эффективности захвата аэрозолей каплями спринклерной системы, так и к некорректному моделированию переноса.

Стоит также упомянуть практические аспекты применения счетного или весового распределения. При моделировании переноса ПД ввиду того, что их активность может быть пересчитана в массу, представляется возможным использовать весовое логнормальное распределение с массовым медианным диаметром в качестве параметра. В свою очередь, при моделировании коагуляции аэрозольных частиц ПД необходимо знать счетное распределение частиц по размерам.

Для перехода между различными размерами аэродисперсной системы рекомендуется использовать формулу Хэтча – Чоута [4], которая имеет вид

$$d_A = d_g \exp(b \ln^2 \sigma_g), \quad (11)$$

где d_A – конвертируемый диаметр; b – коэффициент.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов b для различных искомых диаметров.

Кроме того, на практике встречаются измеренные значения аэродинамического диаметра частицы [5, 8]. Это – диаметр частицы с плотностью 1000 кг/м^3 , у которой скорость осаждения такая же, как и у рассматриваемой частицы [4]. Иначе говоря, частицы, имеющие разные фактические размеры, но одинаковые аэродинамические диаметры D_{aer} , аэродинамически ведут себя аналогично капле воды такого же диаметра D_{aer} . Из условия равенства скоростей осаждения $V_{t,s}$, определенных с помощью закона Стокса, можно получить переход от аэродинамического к эквивалентному диаметру рассматриваемой частицы с учетом поправочного коэффициента Каннингема [4]:

$$V_{t,s} = \frac{\rho_p D_e^2 g_0}{18 \mu_g \chi} = \frac{\rho_0 D_{aer}^2 g_0}{18 \mu_g}; \quad (12)$$

$$D_e = D_{aer} \sqrt{\frac{C_c(D_{aer})}{C_c(D_e)}} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_p}}, \quad (13)$$

где D_e – эквивалентный диаметр частицы; χ – динамический фактор формы (для сферических частиц он равен 1.0); ρ_p – плотность рассматриваемой частицы; ρ_0 – стандартная плотность частицы (1000 кг/м^3); μ_g – динамический коэффициент вязкости среды; g_0 – ускорение свободного падения; $C_c(D_{aer})$ и $C_c(D_e)$ – поправочные коэффициенты Каннингема для аэродинамического и эквивалентного диаметров частицы.

Поправочный коэффициент Каннингема в [14] предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{D_e} \left[1.252 + 0.4 \exp\left(-\frac{1.1D_e}{2\lambda}\right) \right], \quad (14)$$

где λ – длина свободного пробега в среде.

Далее представлены результаты апробации рассмотренной в данной работе методологии описания распределений аэрозольных частиц по размерам на экспериментах TOSQAN [5] и Phebus-FP [12].

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЕРИМЕНТА TOSQAN

Экспериментальная установка TOSQAN представляет собой объем, в котором моделируются теплогидравлические процессы, происходящие в защитной оболочке ядерного реактора с водой под давлением [5]. В ходе экспериментов, помимо изучения теплогидравлических процессов, проводилось исследование вымывания с помощью спринклерной системы частиц карбида кремния плотностью 3200 кг/м^3 , выступающих в качестве имитаторов аэрозольных продуктов деления. Авторами измерялись распределения по размерам как аэрозольных частиц карбида кремния, так и капель воды спринклерной системы.

В настоящей работе была выполнена проверка корректности воспроизведения экспериментального распределения аэрозольных частиц в эксперименте TOSQAN логнормальной функцией распределения. Необходимо подчеркнуть, что экспериментальные данные распределения частиц по размерам были представлены в форме ступенчатых диаграмм, опубликованных в оригинальной статье. При этом для частиц SiC ширина каждой ступени менялась соответственно ширине отверстий сит в гранулометре, в то время как для капель воды ширина каждой ступени была постоянной и равной 10 мкм [5]. Для характеристики каждой ступени диаграммы, т.е. каждой размерной группы, каждая ступень сводилась к одному среднему значению размера, определяемому как среднее между границами данной ступени.

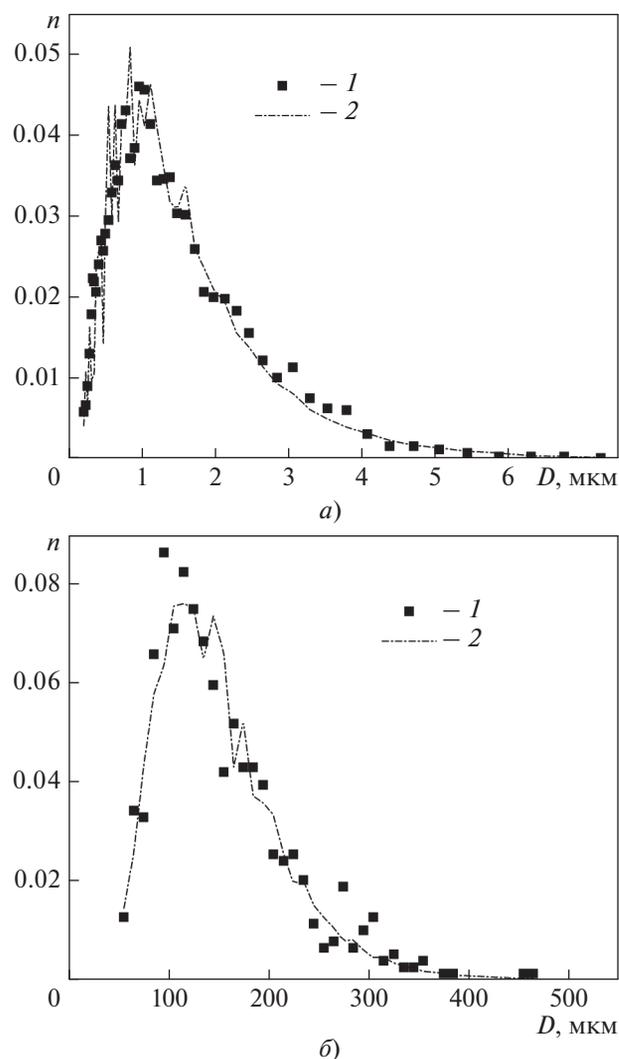


Рис. 3. Счетное распределение частиц SiC (а) и капель спринклерной системы (б) по размерам в эксперименте TOSQAN (1) и результаты расчета (2)

Результаты измерения счетного распределения частиц SiC в эксперименте и результат расчета путем интегрирования логнормальной функции распределения (7) с использованием $d_g = 0.902 \text{ мкм}$ и $\sigma = 1.932$, полученных на основании экспериментальных данных, представлены на рис. 3, а. Кроме того, в экспериментах TOSQAN измерено распределение капель спринклерной системы, которое совместно с результатом расчета по формуле (7) представлено на рис. 3, б ($d_g = 138.579 \text{ мкм}$ и $\sigma = 1.508$, вычисленные на основании экспериментальных данных). На рис. 3 по оси абсцисс отложен диаметр частиц D , по оси ординат – счетная доля частиц n . Согласно полученным результатам, использование логнормальной функции распределения приводит к корректному воспроизведению реальных распределений.

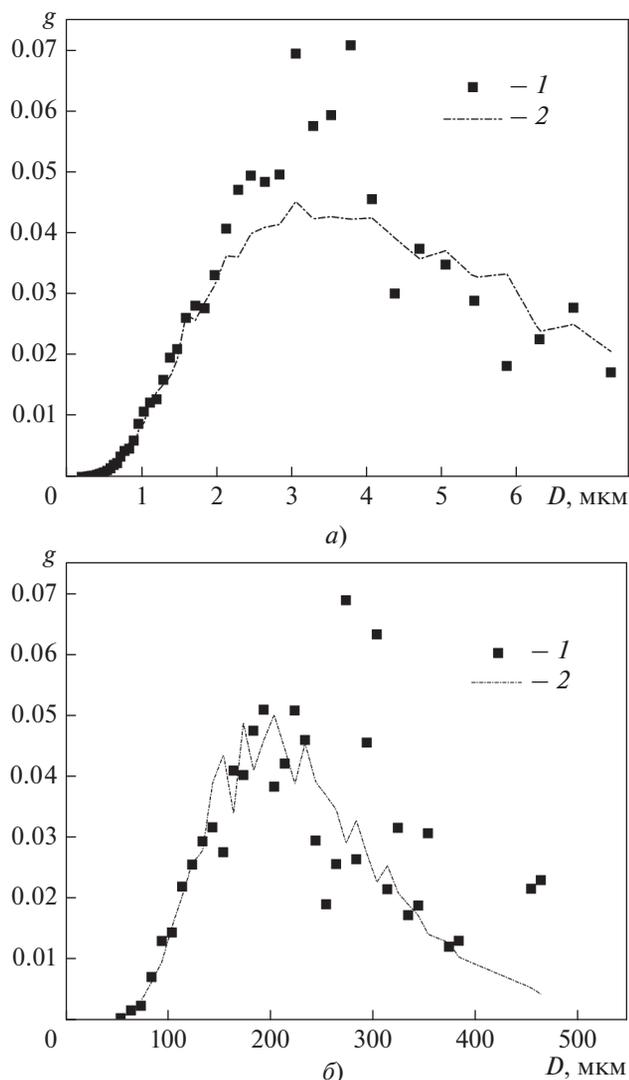


Рис. 4. Экспериментальное (1) и расчетное (2) весовое распределения частиц SiC (а) и капель спринклерной системы (б)

В табл. 2 представлены значения геометрического диаметра, стандартного геометрического отклонения, рассчитанные на основании экспериментальных данных, а также значения массового медианного диаметра для распределения частиц SiC и капель спринклерной системы, полученных по формуле Хэтча – Чоута (11).

С помощью формулы (5) авторами был осуществлен переход от экспериментальных значе-

ний счетного распределения к весовым. На рис. 4 приведены значения весовых долей, полученные при проведении расчета и эксперимента. На этом рисунке по оси ординат отложена весовая доля частиц g .

При проверке условия нормировки (2) для счетного распределения частиц SiC и капель спринклерной системы было установлено, что оно выполняется с погрешностью 1.1 и 1.4% соответственно, что является довольно хорошим результатом. Что касается соблюдения условия нормировки для весовых распределений, то в этом случае удовлетворительного согласия расчетных и экспериментальных данных для частиц SiC и капель спринклерной системы не наблюдалось. Для весового распределения частиц SiC и капель спринклерной системы условие нормировки составляет 89.4%. Подобное формальное невыполнение условия нормировки обусловлено, во-первых, самой функцией распределения, которая является математической формой приближения к реальному распределению, сглаживающей дискретный вид кривой распределения, и, во-вторых, следующими особенностями эксперимента.

Размеры частиц SiC в эксперименте определены с использованием гранулометрического анализа. Следует отметить, что возможны ситуации, когда на последней ступени сит, отверстия в которых в эксперименте соответствуют диапазону размеров от 7.0 до 7.5 мкм, могут осаждаться частицы большего диаметра, однако эти частицы причисляются к указанному выше диапазону. Если при счетном распределении подобная особенность слабо влияет на выполнение условия нормировки, то при весовом распределении, в котором частицы большего размера вносят больший вклад в долю по массе, подобный эффект может быть существенным.

В распределении капель спринклерной системы по размерам есть некоторые “пробелы”. Так, при интегрировании функции логнормального распределения (7) в размерном диапазоне до 50 мкм доля массы частиц составляет 0.1%, а в диапазоне от 390 до 450 мкм – 4.8%, однако эти интервалы не учитываются при проверке условия нормировки.

Практической рекомендацией по устранению подобного невыполнения условия нормировки является формальное продление интервалов ин-

Таблица 2. Основные характеристики эксперимента TOSQAN

Характеристика	Частицы SiC	Капли воды
Средний геометрический диаметр, мкм	0.902	138.579
Стандартное геометрическое отклонение	1.932	1.508
Массовый медианный диаметр, мкм	3.313	229.906

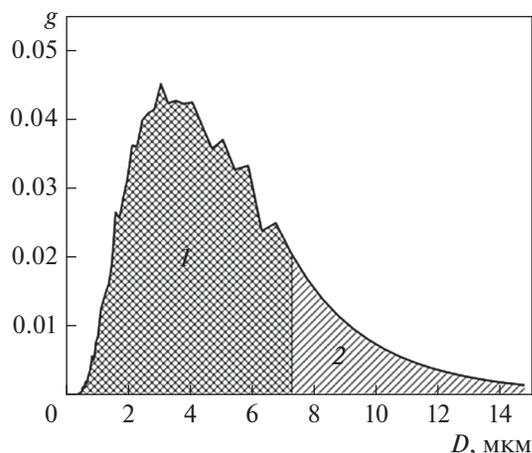


Рис. 5. Уточненное весовое распределение частиц SiC. 1 – распределение, полученное на основе экспериментальных данных; 2 – зона продления распределения

тегрирования путем задания новых размерных групп, используемых при интегрировании функции логнормального распределения (7). Так, например, при продлении рассматриваемого диапазона диаметров для частиц SiC до 15 мкм условие нормировки для весового распределения составляет 98.9%, а при продлении диапазона диаметров для капель спринклерной системы до 700 мкм (с учетом пропущенных интервалов, указанных ранее) – 99.7%.

На рис. 5 показано распределение частиц SiC с учетом продления рассматриваемого диапазона диаметров до 15 мкм.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЕРИМЕНТА PHEBUS-FP

Целью международной программы Phebus-FP [12] было исследование процессов разрушения активной зоны, выхода и переноса продуктов деления, образующихся при тяжелых авариях в легководных реакторах (PWR). В рамках этой программы было проведено четыре экспериментальных теста (далее тесты) (FPT-0 – FPT-3), в которых оценен вклад процессов, влияющих на разрушение топлива и управляющих стержней, выход продуктов деления, их перенос в I контуре и защитной оболочке при разных условиях окисления топлива.

В рамках этой экспериментальной программы было также получено распределение радиоактивных аэрозолей продуктов деления, поступивших в экспериментальную защитную оболочку из I контура. По результатам SEM-анализа авторами [12] было получено, что аэрозольные частицы имеют преимущественно сферическую форму.

Кроме того, авторами [12] указаны параметры распределений (AMMD – аэродинамический массовый медианный диаметр, σ_g – стандартное геометрическое отклонение) для всех тестов FPT-0 – FPT3 (табл. 3). Согласно результатам измерений, представленные параметры схожи, если учитывать относительную погрешность обоих параметров, которую авторы [12] оценили в 20%.

Приведенные параметры распределения использовались для воспроизведения распределений с помощью функции логнормального распределения (7). В качестве используемых значений AMMD и σ_g выбирались средние значения для каждого из экспериментов, при этом AMMD пересчитывался в MMD, т.е. массовый медианный диаметр. Интегрирование проводилось в пределах, соответствующих экспериментальным данным распределения частиц в тесте FPT-3, ввиду отсутствия в открытом доступе экспериментальных данных по распределению аэрозолей по размерам для тестов FPT-0–FPT-2. На рис. 6 приведены полученные распределения и данные экспериментального анализа распределения частиц для теста FPT-3.

По итогам расчета получены следующие результаты по выполнению условия нормировки для тестов, %:

FPT-0	96.6
FPT-1	96.7
FPT-2	94.4
FPT-3	100.0

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для тестов FPT-0 – FPT-2 основная доля частиц приходится на интервалы, соответствующие эксперименту FPT-3, и распределения в этих тестах могут быть описаны с помощью экспериментальной гистограммы теста FPT-3, однако 4–6% доли (по массе) необходимо распределить на частицы размером более 7 мкм для выполнения условия нормировки. При продлении диапазона интегрирования функции логнормального распределения (7) до 15 мкм для теста FPT-0 усло-

Таблица 3. Параметры распределений в тестах Phebus-FP

Параметр	FPT-0	FPT-1	FPT-2	FPT-3
AMMD	3.3–3.5	3.5–3.9	3.6–3.8	3.0–3.3
σ_g	2.0	1.8–2.0	1.9–2.3	1.4

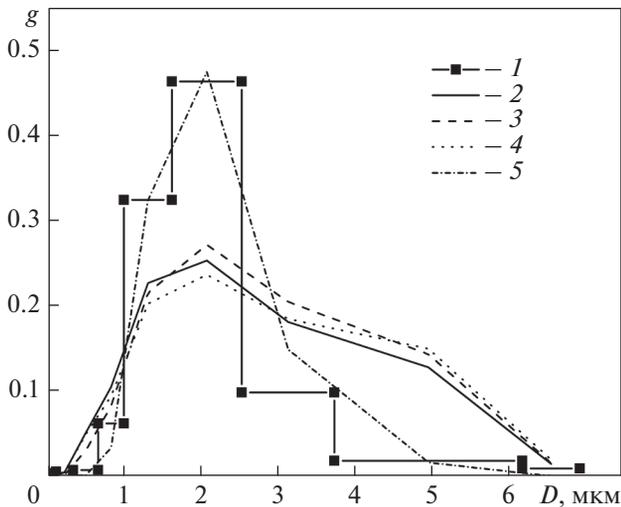


Рис. 6. Весовое распределение аэрозольных частиц по размерам в тестах Phebus-FP. 1 — FPT-3 (экспериментальные данные); расчеты с использованием данных тестов: 2 — FPT-0; 3 — FPT-1; 4 — FPT-2; 5 — FPT-3

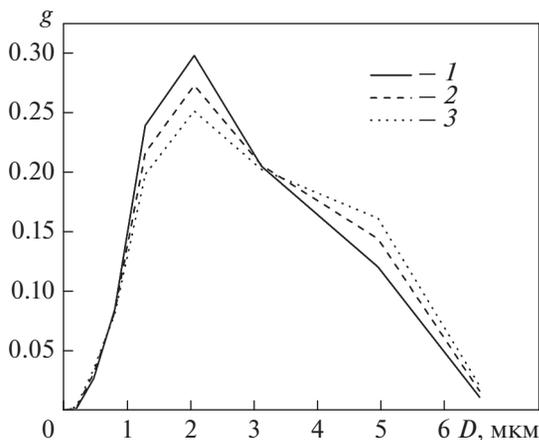


Рис. 7. Результаты расчетов весового распределения аэрозольных частиц по размерам в тесте FPT-1. Расчет: 1 — по левой границе интервала распределения; 2 — по середине интервала распределения; 3 — по правой границе интервала распределения

вие нормировки выполняется на 99.8%, для теста FPT-1 — на 99.9%, для теста FPT-2 — на 99.6%.

Ввиду неопределенности данных (см. табл. 3) был проведен анализ влияния параметров распределения на его вид. На рис. 7 представлен результат варьирования параметров распределения на вид распределения для теста FPT-1. Были получены три распределения, которые соответствуют левой границе интервала диаметра и стандартного геометрического отклонения, середине этого интервала и его правой границе. При использовании

в качестве реперных параметров распределения значений, соответствующих левой границе интервала, увеличивается количество частиц диаметром менее 3 мкм по сравнению с другими вариантами. Для распределения, которое соответствует правой границе интервала параметров, увеличивается количество частиц диаметром более 3 мкм. Использование середины интервала параметров распределения приводит к “осреднению” таким образом, что по сравнению с двумя другими вариантами увеличение количества частиц менее 3 мкм и более 3 мкм, характерное для левой и правой границы интервала соответственно, становится меньше.

Согласно полученным данным, распределения частиц по размерам качественно различаются несущественно. Однако наблюдается различие в выполнении условия нормировки. Так, для варианта с использованием правой границы интервала параметров распределения в тесте FPT-1 условие нормировки выполняется на 94.8%, для варианта с использованием середины интервала — на 96.7%, а для варианта с использованием левой границы интервала — на 98.2%.

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ НА ВЫБРОС ПД В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ АВАРИИ НА АЭС С ВВЭР

В этом разделе рассматривается влияние распределения размеров аэрозолей ПД на их выброс в окружающую среду через неплотности в защитной оболочке на примере сценария аварии “Большая течь Ду 100 мм с отказом активной части CAOЗ” (далее “Большая течь”) для АЭС с ВВЭР-1000. Для анализа поведения аэрозолей ПД использовалось аттестованное программное средство МАВР-ТА [16], разработанное в НИЦ “Курчатовский институт” для решения задач моделирования поведения ПД при тяжелой аварии. Один из модулей этого программного средства позволяет описывать перенос, осаждение и переход в водную среду радиоактивных ПД в объеме ЗО, а также рассчитывать выброс ПД в окружающую среду. При переносе аэрозольных ПД учитываются такие процессы, как гравитационное осаждение аэрозолей, диффузиофорез, термофорез, броуновская диффузия, коагуляция частиц, рост частиц вследствие объемной конденсации. С помощью программного средства МАВР-ТА моделируется динамика изменения распределения размеров аэрозольных частиц в ходе их распространения с учетом указанных процессов. Подробное описание моделей и их валидация представлены в работе [17].

При моделировании аварии “Большая течь” в качестве начального распределения частиц по размерам использовались результаты экспери-

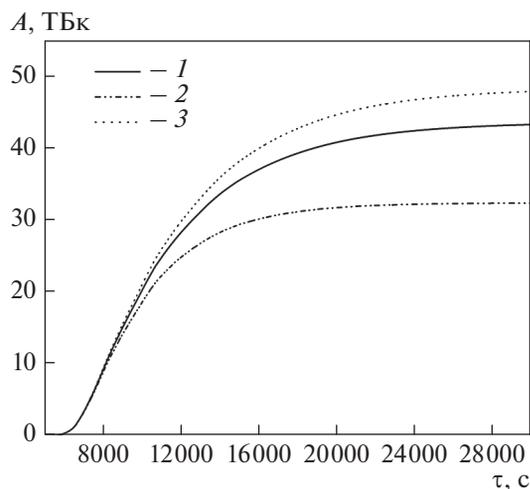


Рис. 8. Выброс ^{137}Cs в окружающую среду через плотности в защитной оболочке. Расчеты с использованием: 1 – базового распределения FPT-1; 2 – среднеарифметического диаметра; 3 – среднемассового диаметра

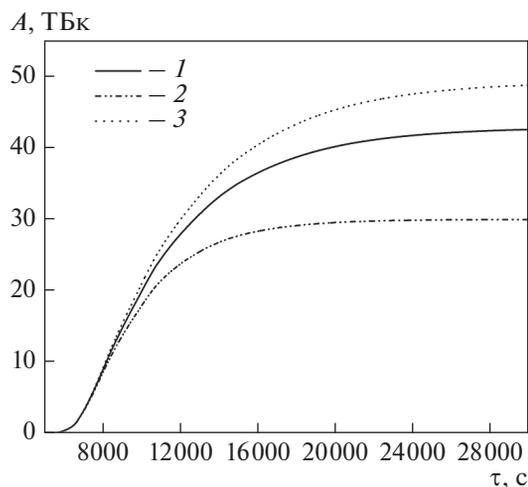


Рис. 9. Выброс ^{137}Cs в окружающую среду через плотности в защитной оболочке. Расчеты с использованием: 1 – базового распределения FPT-2; 2 – среднеарифметического диаметра; 3 – среднемассового диаметра

ментальной программы Phebus-FP. Обоснованность применимости распределений по размерам в тестах Phebus-FP для аварий на реальных АЭС заключается в следующем: вид и характеристики распределения по размерам частиц аэрозолей, поступающих из I контура в ЗО в условиях тяжелой аварии, определяются составом ПД, выходящих из топлива при его плавлении, и характеристиками процессов переноса в I контуре.

Экспериментальные тесты Phebus-FP в настоящее время по своим характеристикам являются наиболее близкими к условиям реальной тяжелой аварии. В ходе экспериментов осуществлялось плавление настоящих твэлов, поэтому выходящие ПД были весьма схожи по составу с ПД, образующимися при тяжелой аварии. В тестах Phebus Phebus-FP I контур смоделирован таким образом, чтобы имитировать условия образования аэрозолей в одной петле I контура реакторной установки благодаря наличию горячего и холодного участков, прямых участков контура и участков с поворотами. В этом случае ключевой характеристикой, определяющей процесс формирования аэрозолей, является время их пребывания в I контуре. Для экспериментов Phebus-FP среднее время пребывания в трубопроводе I контура составляет 17.3 с. Для реакторной установки с ВВЭР-1000 в ходе аварии типа “Большая течь” время пребывания в петле I контура с разрывом составляет 18 с, что соответствует оценке, полученной для тестов Phebus-FP.

При проведении расчетов использовались распределения частиц, полученные в тестах FPT-1–FPT-3 [12]. Для тестов FPT-1 и FPT-2

применялись распределение частиц с продлением диаметра до 15 мкм, среднеарифметические и среднемассовые диаметры данных распределений, вычисленные с помощью формулы Хэтча – Чоута (11). Среднеарифметические диаметры равнялись 0.763, 0.539 и 1.371 мкм для тестов FPT-1, FPT-2, FPT-3 соответственно, а среднемассовые – 2.625, 2.813 и 1.925 мкм. Результаты расчета представлены на рис. 8–10. На рис. 11 сравниваются выбросы ^{137}Cs , определенные с помощью параметров распределений тестов FPT-1 – FPT-3.

Данные, полученные в разных вариантах расчета, приведены в табл. 4.

Таким образом, выбор способа характеристики аэрозольных частиц имеет существенное значение и может оказать влияние на моделирование выброса аэрозолей продуктов деления в окружающую среду. Важно отметить, что использование различных наборов параметров логнормального распределения, полученных с помощью тестов FPT-1–FPT-3, не оказывает существенного влияния на выброс – отличие не превышает 3%.

ВЫВОДЫ

1. Сведение полидисперсного распределения к одному характерному размеру при моделировании приводит к искажению картины переноса частиц в защитной оболочке АЭС, поэтому при использовании полидисперсной системы сводить ее к одному характерному размеру не рекомендуется.

2. Счетное распределение частиц SiC по размерам (эксперимент TOSQAN) корректно опи-

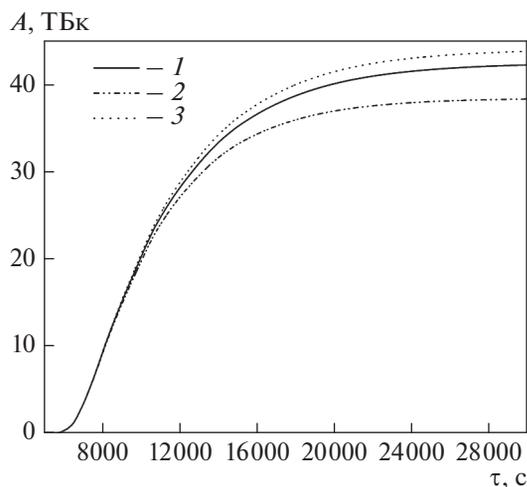


Рис. 10. Выброс ^{137}Cs в окружающую среду через неплотности в защитной оболочке. Расчеты с использованием: 1 – базового распределения FPT-3; 2 – среднеарифметического диаметра; 3 – среднемассового диаметра

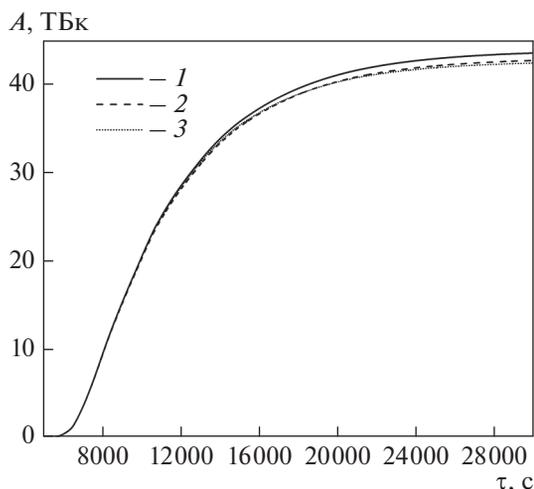


Рис. 11. Выброс ^{137}Cs в окружающую среду через неплотности в защитной оболочке. Использование базового распределения: 1 – FPT-1; 2 – FPT-2; 3 – FPT-3

сывается с помощью логнормальной функции распределения, равно как и счетное распределение каплей спринклерной системы. При весовом распределении для некоторых размерных групп, как для частиц SiC, так и для каплей спринклерной системы, наблюдается отклонение расчетной кривой от экспериментальных значений. Кроме того, не выполняется формальное условие нормировки. Для каплей спринклерной системы в экспериментальном распределении отсутствуют некоторые размерные группы, которые при формальном подходе приводят к потере весовой доли, т.е. к невыполнению условия нормировки.

3. На примере тестов FPT-0 – FPT2 показано хорошее согласие расчетных данных для разных тестов с экспериментальными данными теста FPT-3. Параметры распределений, использованные для расчета, определялись как среднее диапа-

зонов, представленных авторами эксперимента Phebus-FP. В результате для некоторых тестов наблюдается незначительное отклонение от выполнения условия нормировки. Для данных теста FPT-3 как при весовом, так и при счетном распределении условие нормировки выполняется точно. Использование экспериментальной диаграммы теста FPT-3 применительно к тестам FPT-0 – FPT-2 ввиду отсутствия экспериментальных распределений этих экспериментов в открытом доступе приводит к хорошему приближению при проверке условия нормировки.

4. При практическом использовании исходных данных тестов Phebus-FP, в которых параметры распределения частиц по размерам представлены в виде интервалов, необходимо аккуратно интерпретировать полученные результаты. При выборе разных пар значений параметров из интерва-

Таблица 4. Результаты численного моделирования выброса ^{137}Cs на момент окончания расчета при использовании разных распределений аэрозольных частиц по размерам

Характеристика	Тест		
	FPT-1	FPT-2	FPT-3
Логнормальное распределение (базовое), ТБк	43.4	42.6	42.3
Средний арифметический диаметр, ТБк	32.5	29.9	38.4
Отклонение от базового распределения, %	-25.11	-29.81	-9.00
Средний массовый диаметр, ТБк	48.0	48.7	43.8
Отклонение от базового распределения, %	10.59	14.32	3.55

лов наблюдается совпадение расчетных кривых распределения по размерам частиц. Однако, несмотря на визуальную схожесть кривых, возможно невыполнение условия нормировки. Для обеспечения безопасности АЭС при отсутствии возможности обосновать реалистичные значения параметров необходимо выбрать те параметры, которые соответствуют наиболее консервативному результату.

5. Невыполнение условия нормировки при переходе от счетного к весовому распределению может вызывать существенные трудности при моделировании реальных объектов, поскольку при таком переходе возможны потери массы частиц. Так, при весовом распределении нарушение условия нормировки приводит к потере массы частиц до 11%. Этот факт был проиллюстрирован в эксперименте TOSQAN. Во избежание таких ситуаций практической рекомендацией является продление пределов интегрирования функции распределения до приемлемого достижения условия нормировки либо непосредственный пересчет экспериментального счетного распределения в весовое (или наоборот), поскольку в этом случае условие нормировки для заданного распределения выполняется строго. Таким образом, при соблюдении указанных рекомендаций можно корректно описывать распределения аэрозольных частиц по размерам.

6. Использование в расчетах среднемассового диаметра приводит к завышенным значениям выброса аэрозольных частиц. Такой подход может быть применен при консервативном моделировании запроектной аварии. Логнормальное распределение частиц соответствует реалистичному подходу к моделированию аварии и может быть рекомендовано при моделировании радиационных последствий тяжелых аварий. Результаты расчетного моделирования также показали, что использование распределений, представленных в тестах FPT-1–FPT-3, приводит к практически одинаковым значениям выброса аэрозольных частиц (различие не более 3%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фукс Н.А.** Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
2. **Самойлов О.Б., Уснин Г.Б., Бахметьев А.М.** Безопасность ядерных энергетических установок: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. **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. Techn. 1971. V. 10. Is. 4. P. 499–519. <https://doi.org/10.13182/NT71-A16261>
4. **Hinds W.C., Zhu Y.** Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles. 3rd ed. Wiley, 2022.
5. **Experimental** and numerical approaches of aerosol removal in spray conditions for containment application / E. Porcheron, P. Lemaitre, D. Marchand, W. Plume-cocq, A. Nuboer, J. Vendel // Nucl. Eng. Des. 2010. V. 240. Is. 2. P. 336–343. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.08.023>
6. **AHMED** experiments on hygroscopic and inert aerosol behaviour in LWR containment conditions: experimental results / J.M. Makynen, J.K. Jokiniemi, P.P. Ahonen, E.I. Kauppinen, R. Zilliacus // Nucl. Eng. Des. 1997. V. 178. Is. 2. P. 45–49. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(97\)00174-X](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(97)00174-X)
7. **Brownian** coagulation of polydisperse aerosols in the transition regime / D.S. Kim, S.H. Park, Y.M. Song, D.H. Kim, K.W. Lee // J. Aerosol Sci. 2003. V. 34. Is. 7. P. 859–868. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(03\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00055-7)
8. **Kissane M.P.** On the nature of aerosols produced during a severe accident of a water-cooled nuclear reactor // Nucl. Eng. Des. 2008. V. 238. Is. 10. P. 2792–2800. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.06.003>
9. **Gregoire A.C., Haste T.** Material release from the bundle in Phebus FP // Ann. Nucl. Energy. 2013. V. 61. P. 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.02.037>
10. **NUREG-1465.** Accident source terms for light-water nuclear power plants: Final Rep. / L. Soffer, S.B. Burson, C.M. Ferrell, R.Y. Lee, J.N. Ridgely. US, Washington, Nuclear Regulatory Commission, 1995.
11. **Haste T., Payot F., Bottomley P.D.W.** Transport and deposition in the Phébus FP circuit // Ann. Nucl. Energy. 2013. V. 61. P. 102–121. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.10.032>
12. **Containment** behavior in Phébus FP / M. Laurie, P. March, B. Simondi-Teisseire, F. Payout // Ann. Nucl. Energy. 2013. V. 60. P. 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.03.032>
13. **Beard A.M., Kauppinen E.** Data report: characterization of FALCON aerosol source. AEA Reactor Services, VTT: FAL/ISP(92)22, 1992.
14. **Reist P.C.** Aerosol science and technology. 2nd ed. McGraw-Hill, 1993.
15. **Савекин С.С., Шмельков Ю.Б.** Моделирование выведения аэрозолей из атмосферы защитной оболочки АЭС с помощью спринклерной системы // Теплоэнергетика. 2022. № 2. С. 16–22. <https://doi.org/10.1134/S0040363622020059>
16. **МАВР-ТА.** Аттестационный паспорт программного средства № 535 от 05.11.2021.
17. **Development** and validation of the MAVR-TA code for analyzing the release and transport of fission products during a severe accident at a VVER NPP. Part 2 – Modelling of the fission products transport in the primary circuit and inside the containment / Yu.B. Shmelkov, Yu.A. Zvonarev, N.V. Shutov, L.V. Petrov // Nucl. Eng. Des. 2021. V. 382. P. 111377. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111377>

Analysis of the Influence of Aerosol Particle Size Distribution on the Behavior of Fission Products during Simulation of an Accident at an NPP with VVER

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

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

**e-mail: starsavrus@gmail.com*

Abstract—Due to the potential danger of exposure to aerosol particles on the human body, maximum permissible concentrations of harmful substances are limited by current regulatory documentation. The formation of aerosol particles is possible during beyond design basis accidents at nuclear power plants. The consequences of the radioactive impact of radioactive aerosol particles formed during an accident at a nuclear power plant on the human body are significantly more severe than from the mechanical impact of such particles. An important characteristic of radioactive aerosol particles is their polydispersity (unevenness in size) since particles of different sizes during an accident at a nuclear power plant have different rates of removal from the atmosphere of the nuclear power plant's containment shell. Thus, when considering the movement of particles in the containment and the release of aerosol particles into the environment, it is important to correctly model the size distribution of aerosol particles. This paper presents the results of calculating the count and weight distributions of aerosol particles by size in the TOSQAN and Phebus-FP experiments. Methods are given for describing polydisperse systems (using particle size distribution or "average" sizes characterizing the entire distribution) and their influence on processes associated with the transfer of aerosol particles in a protective shell, and practical recommendations for working with particle size distributions are given. A comparison is made of the use of average size distribution characteristics and the lognormal distribution of aerosol particles to estimate the release during a hypothetical accident at a nuclear power plant with VVER.

Keywords: reactor plant, aerodisperse systems, aerosol particles, size distributions, nuclear power plants, VVER, accident modeling, TOSQAN and Phebus-FP experiments