

РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ АЭРОЗОЛЬНОГО МОДУЛЯ AERCONT ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА TITAN-2/V1.0 В ЧАСТИ МОДЕЛЕЙ ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ¹

© 2025 г. Д. С. Синицын^{а, *}, Д. А. Назаров^а, О. В. Тарасов^а, Н.А. Мосунова^а, А. А. Сорокин^{а, **}

^аИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
Большая Тульская ул., д. 52, Москва, 115191 Россия

*e-mail: synitsyn@ibrae.ac.ru

**e-mail: sorokin@ibrae.ac.ru

Поступила в редакцию 06.03.2025 г.

После доработки 24.03.2025 г.

Принята к публикации 02.04.2025 г.

Безопасная эксплуатация реакторных установок во многом зависит от понимания и точности прогнозирования процессов образования, переноса и осаждения аэрозолей продуктов деления во время возможных аварийных ситуаций. Аэрозоли представляют собой мелкодисперсные частицы, образующиеся в результате разрушения ядерного топлива и конструкционных материалов активной зоны реактора. Они могут переноситься с потоком газа и пара, оседать на различных поверхностях и вызывать радиоактивное загрязнение оборудования и помещений. Представлены результаты верификации и валидации модели осаждения аэрозольных частиц в аэрозольном модуле AERCONT в составе интегрального кода TITAN-2/V1.0, разработанного для расчета поведения газов, паров и аэрозолей продуктов деления в газопаровом теплоносителе в I контуре и помещениях защитной оболочки АЭС с реакторной установкой технологии ВВЭР. Осаждение аэрозолей продуктов деления определяет появление и накопление радиоактивных отложений на стенках контура и помещений. Поэтому валидация моделей для расчета этого процесса является необходимой и представляет практический интерес в плане радиационной безопасности. Представлено краткое описание модели поведения многокомпонентных и полидисперсных аэрозолей продуктов деления, методов численного решения системы дифференциальных уравнений и выполнено ее сопоставление с аналогичными подходами. Приведены результаты валидации модели осаждения частиц на экспериментальных данных. Размеры частиц, температурные градиенты и режим течения влияют на скорость осаждения, что имеет решающее значение для оценки источников загрязнения и разработки эффективных стратегий смягчения последствий при развитии аварий на АЭС.

Ключевые слова: продукты деления, аэрозольные частицы, многокомпонентный состав, осаждение аэрозолей, броуновская и турбулентная диффузия, валидация, интегральный код, защитная оболочка

DOI: 10.56304/S0040363625600193

Одним из основных элементов интегрального кода, предназначенного для моделирования (прогнозирования) поведения реакторной установки (РУ) при нормальных и аварийных режимах работы, является модуль поведения продуктов деления в I контуре и помещениях защитной оболочки. Моделирование образования и эволюции аэрозолей продуктов деления — необходимое условие достоверной оценки последствий возможного выхода радиоактивных частиц за пре-

делы корпуса реактора в помещения защитной оболочки и, как следствие, радиоактивного загрязнения окружающей среды. При этом помимо различных активных и пассивных технологических систем обеспечения безопасности РУ значительный вклад в задержку распространения продуктов деления в аварийных ситуациях вносит естественный физический процесс — осаждение аэрозолей и паров продуктов деления при переносе вместе с пароводяным теплоносителем в контуре циркуляции и распространении в помещениях защитной оболочки РУ. Поэтому важным направлением развития расчетных кодов являются совершенствование моделей поведения продуктов деления в различных фазовых состояниях и обоснование моделирования для различ-

¹ Исследование выполнено в рамках работ “Подготовка, прохождение экспертизы и аттестации в Ростехнадзоре интегральных кодов для мультифизического моделирования АЭС с реакторной установкой ВВЭР TITAN-1/V1.0 и TITAN-2/V1.0 — компонентов программно-технического комплекса Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР”.

ных условий течения среды, геометрических конфигураций каналов и помещений.

Осаждение аэрозолей продуктов деления — причина появления и накопления радиоактивных отложений на стенках контура и помещений. Соответственно валидация моделей для расчета этого процесса не только необходима, но и представляет большое практическое значение при оценке радиационной безопасности атомных электростанций. Конечно, это направление не является новым, и устойчивый интерес к таким моделям наблюдается последние 30–40 лет [1–9]. Однако данная тема не становится менее актуальной, что связано как с более жесткими требованиями к валидации моделей для различных процессов в кодах оценки безопасности, так и с появлением новых экспериментальных данных. Кроме того, при разработке интегральных кодов необходима валидация моделей также на результатах интегральных экспериментов.

Данная статья посвящена описанию моделей осаждения аэрозольных частиц вследствие различных механизмов, реализованных в расчетном аэрозольном модуле AERCONT. В качестве обоснования правильности программного моделирования приведены результаты валидации модели на экспериментальных данных. Помимо этого, новизна представленной модели обусловлена учетом интегральности процесса осаждения, включающего в себя несколько механизмов, и моделированием многокомпонентного состава как аэрозолей, так и радиоактивных отложений на поверхностях, что позволяет достоверно вычислять активность с учетом вклада всех важных радионуклидов. Дальнейшее развитие кода связано с расширением валидационной базы экспериментов и уточнением используемых корреляций, в особенности для частиц аэрозолей субмикронного размера.

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Аэрозольный модуль AERCONT предназначен для моделирования образования многокомпонентных аэрозолей и паров продуктов деления и их поведения в I контуре и помещениях защитной оболочки РУ при гипотетической тяжелой аварии с выходом продуктов деления и материалов конструкций реактора в поток теплоносителя и атмосферу помещений. В текущей версии интегрального кода в аэрозольном модуле рассматриваются три фазовых состояния для продуктов деления и конструкционных материалов:

газ или пар;

полидисперсные и многокомпонентные частицы аэрозоля;

отложения продуктов деления и конструкционных материалов на поверхности стен.

При применении модуля обеспечивается возможность моделировать следующие основные физические процессы поведения продуктов деления в I контуре и атмосфере помещений РУ:

выход радионуклидов из дефектных твэлов в поток теплоносителя;

перенос газов, паров и аэрозолей вместе с теплоносителем в каналах I контура;

выход газов, паров и аэрозолей из дефектных каналов I контура в атмосферу помещений защитной оболочки;

нуклеация аэрозолей для паров продуктов деления и материалов конструкций;

коагуляция многокомпонентных полидисперсных частиц аэрозоля;

объемная конденсация различных паров на поверхность аэрозолей;

поверхностная конденсация паров на стенках каналов I контура и помещений защитной оболочки;

поглощение водяного пара гигроскопическими аэрозольными частицами;

радиоактивный распад радионуклидов в составе газов, паров и аэрозолей;

осаждение аэрозолей на поверхности стен помещений защитной оболочки;

образование многокомпонентного радиоактивного слоя отложений продуктов деления на стенках каналов I контура и помещений РУ;

выход газов, паров и аэрозолей продуктов деления за пределы помещений защитной оболочки через систему вентиляции и неплотности стен помещений.

Для моделирования интегрального процесса поведения продуктов деления в технологических системах электростанции необходимо, в первую очередь, обосновать правильность моделирования каждого из рассматриваемых в модели физических явлений [1, 2, 10]. Некоторые результаты верификации и валидации моделей аэрозольного модуля были приведены ранее в [11–14]. В данной работе представлены результаты валидации модуля в части осаждения аэрозольных частиц на поверхность.

Основной объект для моделирования аэрозольных процессов — расчетная пространственная ячейка нодализационной схемы рассматриваемого элемента РУ. Параметры и структура ячейки одинаковы для аэрозольного и теплогидравлического модулей в составе интегрального кода. При инициализации аэрозольного модуля пользователь имеет возможность выбирать перечень моделируемых в расчете аэрозольных явлений. При этом текущий расчетный шаг по времени при решении динамических уравнений в аэрозольном модуле принимается минимальным из характерных времен для рассматриваемых в данном расчете аэрозольных явлений. Однако по

времени он в аэрозольном модуле не может превышать таковой в теплогидравлическом модуле. Таким образом, шаг по времени из теплогидравлического модуля является внешним ограничением сверху для шага по времени в аэрозольном модуле. Такой подход позволяет учитывать влияние изменения теплогидравлических параметров теплоносителя, например температуры и давления, на скорость протекания аэрозольных процессов. В большинстве случаев характерные времена процессов для аэрозолей продуктов деления в I контуре и помещениях РУ существенно меньше характерного времени изменения теплогидравлических параметров. Также в рамках канального приближения предполагается, что в объеме каждой расчетной пространственной ячейки нодализационной схемы элементов РУ выполняется условие гоомогенного смешения для всех газовых и аэрозольных компонентов.

Для расчета поведения полидисперсных аэрозолей продуктов деления в подавляющем большинстве интегральных кодов оценки безопасности АЭС с РУ на тепловых и быстрых нейтронах используется метод фракций (например, в зарубежных CONTAIN, MELCOR, ASTEC и российских СОКРАТ/ВЗ, TITAN-2/V1.0, МАВР-ТА). Однако только для аэрозольных модулей в интегральных кодах MELCOR, TITAN-2/V1.0 отличительной особенностью является учет многокомпонентного состава для полидисперсных аэрозолей продуктов деления и конструктивных материалов. В других кодах рассматривается средний состав для всех аэрозолей в соответствии с суммарными массами материалов, сконденсировавшихся на всех частицах.

Как следствие, основными моделируемыми переменными в аэрозольных модулях интегральных кодов MELCOR, TITAN-2/V1.0 являются массы для каждого j -го конденсирующегося компонента [$j = 1, 2, \dots, N_{FP} M_i^j$, где N_{FP} — число конденсирующихся компонентов (FP — от англ. Fission Product)] на частицах каждой i -й фракции аэрозолей [$i = 1, 2, \dots, N_{bin}$, где N_{bin} — число размерных фракций (bin — от англ. bin) массой одной частицы m_i]. Для сравнения в кодах с моделированием только среднего состава многокомпонентных аэрозолей (например, ASTEC, СОКРАТ) главными моделируемыми переменными являются концентрации частиц N_i для каждой фракции и суммарные массы M_{tot}^j j -го компонента в составе частиц всех фракций.

Таким образом, в первом подходе (MELCOR, TITAN-2) общее число уравнений аэрозольной кинетики, наряду с уравнениями для конденсирующихся паров, составляет $N_{eq}^{tot} = N_{bin} \times N_{FP}$ (tot — от англ. total; eq — от англ. equation). Для сравнения, в приближении модели частиц среднего состава (ASTEC, СОКРАТ) общее число

уравнений аэрозольной кинетики равно $N_{eq}^{tot} = N_{bin} + N_{FP}$. Очевидно, что первый подход является более физически обоснованным, так как состав частиц для каждой размерной фракции определяется индивидуально в соответствии с динамикой накопления массы каждого из конденсирующихся компонентов в составе частиц этой фракции. Поэтому и состав аэрозольных частиц из разных фракций в этом подходе может быть различным, а выравнивание составов частиц с выходом на среднее значение происходит в результате “смешения составов” частиц из разных фракций вследствие коагуляции и/или конденсации паров на частицах [13].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

В моделях осаждения аэрозолей в большинстве кодов, используемых при расчетах тяжелых аварий (например, CONTAIN, MELCOR, ASTEC, СОКРАТ, TITAN-2/V1.0), предполагается, что различные механизмы осаждения действуют независимо один от другого. При этом скорость осаждения аэрозолей на поверхность зависит от формы поверхности и ее ориентации: например, пол, вертикальная или наклонная стена, потолок, дополнительные поверхности оборудования в объеме помещения или водная поверхность бассейна или приямка с водой.

Механизмы осаждения аэрозолей продуктов деления на поверхность, учитываемые в аэрозольном модуле, включают в себя гравитационное осаждение, броуновскую и турбулентную диффузию и термофорез. Суммарную скорость осаждения V_d (d — от англ. deposition) вычисляют как арифметическую сумму, т.е. без учета интерференции различных механизмов, по формуле

$$V_d = V_{g,d} + V_{b,d} + V_t + V_{tf},$$

где $V_{g,d}$ — скорость гравитационного осаждения (g,d — от англ. gravity deposition), м/с; $V_{b,d}$ — скорость осаждения за счет броуновской диффузии (b,d — от англ. brownian diffusion), м/с; V_t — скорость осаждения вследствие влияния турбулентности несущего потока (t — от англ. turbulence), м/с; V_{tf} — скорость осаждения под действием термофореза (tf — от англ. thermophoresis), м/с.

Седиментация частиц аэрозоля

Скорость гравитационного осаждения аэрозольной частицы зависит от силы сопротивления среды и вычисляется по выражению [1, 10]

$$V_{g,d} = V_{Sk} C_n \cos \varphi,$$

где V_{Sk} — скорость Стокса, м/с; C_n — поправка Каннингема [15]; φ — угол между направлением силы тяжести и нормалью к поверхности, рад.

Вклад гравитационного осаждения существенен для частиц размером более 1 мкм.

Броуновская диффузия

В ламинарном потоке осаждение частиц диаметром менее 1 мкм определяется главным образом броуновской диффузией. В зависимости от скорости потока газа рассматривают два варианта для скорости осаждения частиц [1, 2, 10]. При малой скорости потока ($V_{g,d} \leq 0.001$ м/с) скорость осаждения рассчитывается как

$$V_{b,d} = \frac{D_{b,d}}{L_c},$$

где

$$D_{b,d} = \frac{k_B T_g C_n}{3\pi\mu_g d_p}$$

— коэффициент броуновской диффузии частиц, м²/с; L_c — характерная длина расчетной ячейки (c — от англ. cell) (по умолчанию используется значение 10^{-4} м); k_B — постоянная Больцмана, Дж/К; T_g — температура окружающей среды (газа), К; μ_g — динамический коэффициент вязкости газа, кг/(м · с); d_p — диаметр частицы, м (p — от англ. particle);

$$C_n = 1 + Kn \left[1.257 + \frac{0.4}{\exp(1.1/Kn)} \right];$$

$Kn = l_g/r_p$ — число Кнудсена для частицы; l_g — длина свободного пробега газа, м; r_p — радиус частицы, м.

При $V_{g,d} > 0.001$ м/с значение скорости диффузионного осаждения $V_{b,d}$ определяется из соотношений Gormley — Kennedy [1, 10]:

$$\frac{n_{out}}{n_{in}} = 1 - 4.07h^{2/3} + 2.4h + 0.446h^{2/3}$$

для $h \leq 0.0156$;

$$\frac{n_{out}}{n_{in}} = \frac{0.819}{\exp(7.31h)} + \frac{0.0975}{\exp(44.6h)} + \frac{0.0325}{\exp(114h)}$$

для $h \geq 0.0156$;

$$V_{b,d} = \frac{\pi D_h^2 v_g}{4 S_{tot}} \left(\frac{n_{in}}{n_{out}} - 1 \right),$$

где

$$h = 2 \frac{D_{b,d} L}{V_g d_h^2};$$

d_h — гидравлический диаметр канала, м; L — длина канала, м; v_g — объем газа в ячейке, м³; S_{tot} — суммарная площадь поверхностей в ячейке, м²; n_{in} , n_{out} — концентрация частиц на входе в канал и выходе из него, м⁻³.

Турбулентная диффузия

В турбулентном потоке (т.е. когда число Рейнольдса $Re > 2300$) скорость осаждения частиц определяется главным образом турбулентной диффузией и механизмом turbulent eddy imraction (турбулентное вихревое столкновение). При вычислении скорости осаждения используют число Стокса частицы Sk , параметр f_{fr} (fr — от англ. friction) и скорость колебательного движения частицы в пограничном слое у стенки V_{fr} [1, 10]:

$$Sk = v_g/d_p; \quad f_{fr} = 0.0014 + \frac{0.125}{Re^{0.32}};$$

$$V_{fr} = V_g \sqrt{f_{fr}/2}.$$

Скорости осаждения частиц вследствие турбулентной диффузии $V_{t,d}$ и инерционного механизма $V_{t,in}$ вычисляют в соответствии с [1, 2]:

$$\phi = 0.345 Sk^{1/3};$$

$$F(\phi) = \frac{14.5}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{2\sqrt{3}} \ln \frac{(1+\phi)^2}{1-\phi+\phi^2} + \arctg \frac{2\phi-1}{\sqrt{3}} + \frac{\pi}{6} \right];$$

$$V_{t,d} = \frac{V_{fr}}{Sk^{2/3} F(\phi)}; \quad V_{t,in} = V_{fr} \min \left[1.6 \times 10^{-4} (\tau_w^+)^2 \right];$$

$$\tau_w^+ = \frac{V_{Sk} f_{Sk} C_n}{g v_g} V_{fr}^2; \quad V_{Sk} = \frac{2 g \rho_p r_p^2}{9 \mu_g},$$

где τ_w^+ — характерное время релаксации частицы в пограничном слое у стенки (w — от англ. wall); V_{Sk} — скорость Стокса для частицы данного радиуса и параметра Стокса, м/с; $f_{Sk} = 1$ [10].

Суммарный вклад в скорость осаждения для турбулентного потока рассчитывают по аддитивному правилу [2]

$$V_t = V_{t,d} + V_{t,in}.$$

Термофорез

Термофорез — это механизм индуцированного движения частиц в поле градиента температуры [1]. При осаждении на стенках он зависит от разницы температур поверхности и газа вблизи стенок.

Скорость осаждения под действием термофореза вычисляют в приближении модели Talbot [2]

$$V_{tf} = - \frac{v_g}{T_g} \frac{dT_g}{dr} \Big|_w \frac{2c_s \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_p} + c_t Kn \right) C_n}{(1+3c_m Kn) \left[1 + 2 \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_p} + c_t Kn \right) \right]},$$

где T_g , v_g — средние по объему ячейки температура, К, и кинематический коэффициент вязкости газа, м²/с; $dT_g/dr|_w$ — градиент температуры газа

у стенки, К/м; λ_p – коэффициент теплопроводности аэрозольной фазы [по умолчанию принимается $\lambda_p = 20$ Вт/(м · К), как для металлической фазы)]; λ_g – коэффициент теплопроводности смеси газов теплоносителя и продуктов деления, Вт/(м · К), который рассчитывается в гидравлическом модуле; $c_m = 1.14$, $c_s = 1.17$, $c_t = 2.18$ – коэффициенты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ

Модель осаждения валидировалась на результатах большого числа экспериментов, включая STORM SR11 (ISP-40), MARVIKEN ATT-4, FALCON FAL-ISP1 и FAL-ISP2 (ISP-34), AHMED, PNEBUS FPT1 и др. В настоящей работе для примера приведены данные исследований осаждения аэрозолей при влиянии броуновской и турбулентной диффузии и термофореза [16] и вследствие броуновской диффузии и седиментации частиц [17]. Важная особенность этих исследований заключается в том, что выполнялись несколько циклов экспериментов для различных теплогидравлических условий и аэрозольных частиц разного диаметра.

В соответствии с [18] методика оценки погрешностей результатов расчетов, полученных по программе для ЭВМ, базируется на методиках [19, 20]. Соответственно для каждого эксперимента проводили 100 многовариантных расчетов, в которых случайным образом варьировались определяющие параметры в диапазоне, полученном на основе приведенных экспериментальных

погрешностей. Распределение параметров по интервалу предполагалось равномерным. После статистического анализа результатов многовариантных расчетов вычисляли минимальные, средние и максимальные значения моделируемых параметров, а также находили среднее отклонение и общую неопределенность валидации.

Схема экспериментальной установки, использованной в работе [16], показана на рис. 1. Вертикальная прямая труба (экспериментальный участок) общей длиной 2.74 м и внутренним диаметром 4.3 мм условно разделена на две секции – горячую (верхняя часть) длиной 1.56 м и холодную (нижняя часть) длиной 1.18 м. Обе части независимо одна от другой нагревались до требуемой температуры с помощью внешних теплообменников в зависимости от характера исследования. Измерительная аппаратура состояла из расходомера, термопар, а также пробоотборного анализатора. Объектом исследования были аэрозольные частицы NaCl диаметром от 0.038 до 0.50 мкм. Эксперименты выполняли при температуре 23–125°C и расходе воздуха 4–32 дм³/мин. Определяли эффективность осаждения частиц E (от англ. efficiency) – отношение массы осевших частиц к полной массе инжектированных частиц на поверхности нижней части экспериментального участка. Условия для различных серий эксперимента приведены в табл. 1.

Эксперимент № 1 был посвящен исследованию влияния броуновской диффузии на осаждение частиц в отсутствие разницы между температурами несущей среды и поверхности трубы. На

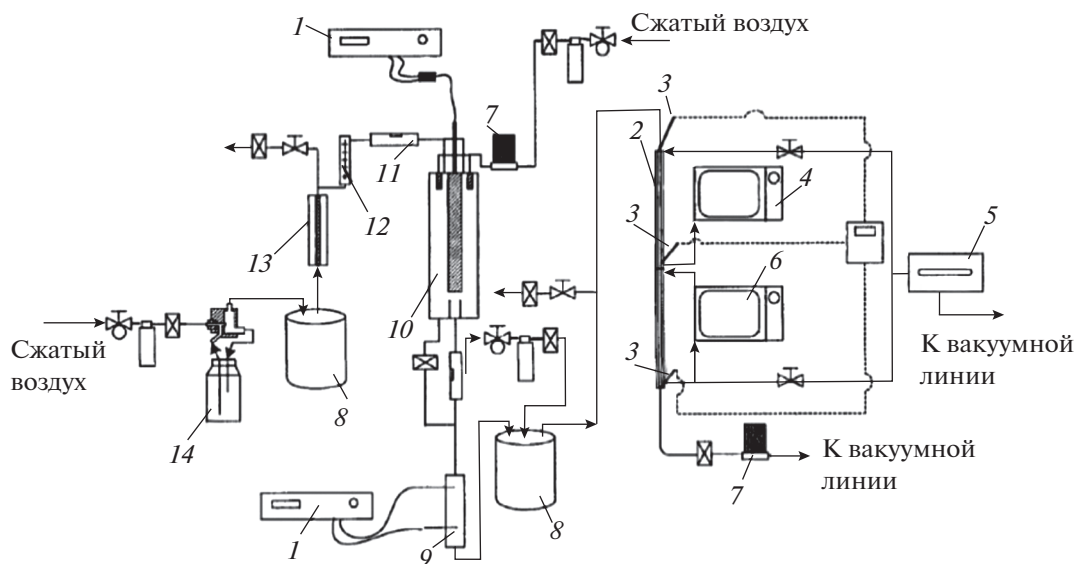


Рис. 1. Схема экспериментальной установки [16].

1 – высоковольтный блок питания; 2 – экспериментальный участок; 3 – термопара; 4, 6 – теплообменники масляный и водяной; 5 – пробоотборный анализатор TSI 3760 CNC; 7 – массовый расходомер; 8 – бак; 9 – электрический конденсатор; 10 – анализатор дифференциальной подвижности DMA 3081; 11 – электростатический нейтрализатор; 12 – ротаметр; 13 – диффузионная сушилка; 14 – атомайзер

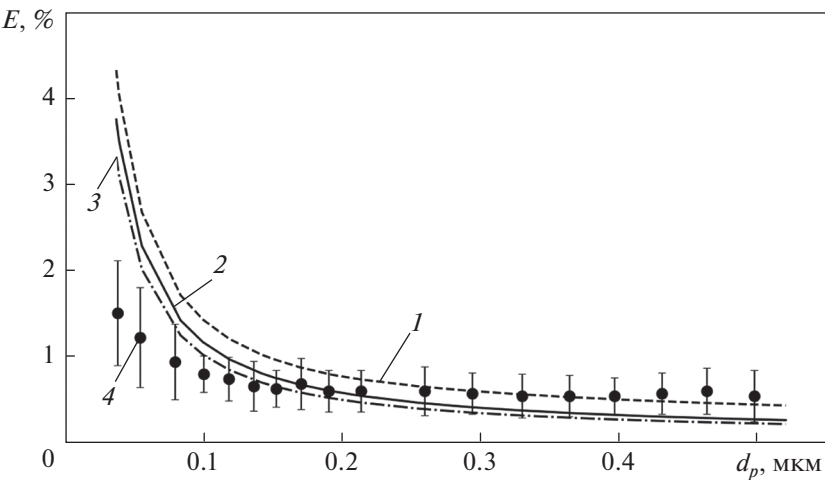


Рис. 2. Зависимость эффективности осаждения частиц E от их диаметра d_p при броуновской диффузии (эксперимент № 1). Расчетные значения: 1 – максимальные; 2 – средние; 3 – минимальные; 4 – экспериментальные данные

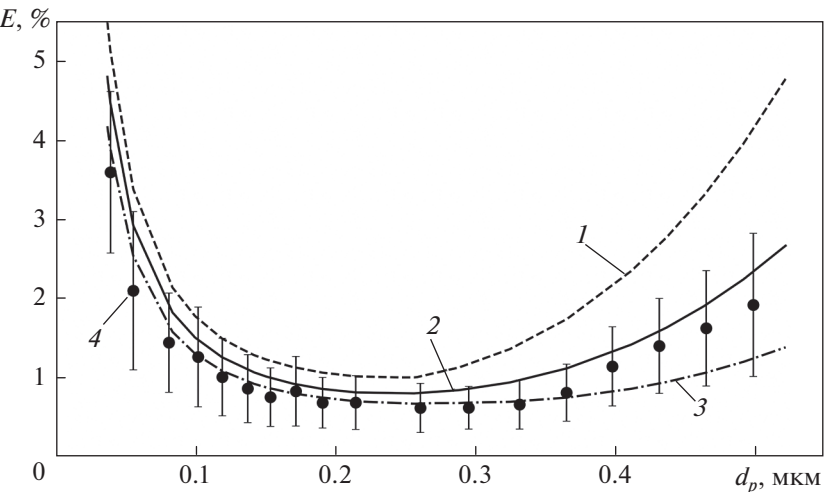


Рис. 3. Зависимость эффективности осаждения частиц от их диаметра при турбулентной диффузии (эксперимент № 4). Обозначения см. рис. 2

рис. 2 показана зависимость эффективности осаждения частиц от их диаметра при броуновской диффузии. Некоторая недооценка эффективности осаждения частиц диаметром менее 0.1 мкм вызвана влиянием неоднородности течения газа на начальном участке трубы.

В эксперименте № 4 исследовали осаждение частиц при реализации механизма турбулентной

диффузии и отсутствии разницы между температурами стенки трубы и газа (рис. 3).

В остальных экспериментах изучали осаждение частиц при совместном действии механизмов термофореза и диффузии для ламинарного и турбулентного течений. Для этого газовую среду и верхний участок трубы нагревали до заданной температуры, а нижний участок трубы оставляли

Таблица 1. Параметры экспериментальных исследований при температуре “холодного” участка 296 К [16]

Параметр	Номер эксперимента						
	1	2	3	4	5	6	7
Расход воздуха, дм ³ /мин	4	4	4	20	20	32	32
Температура “горячего” участка, К	296	343	373	296	343	343	398

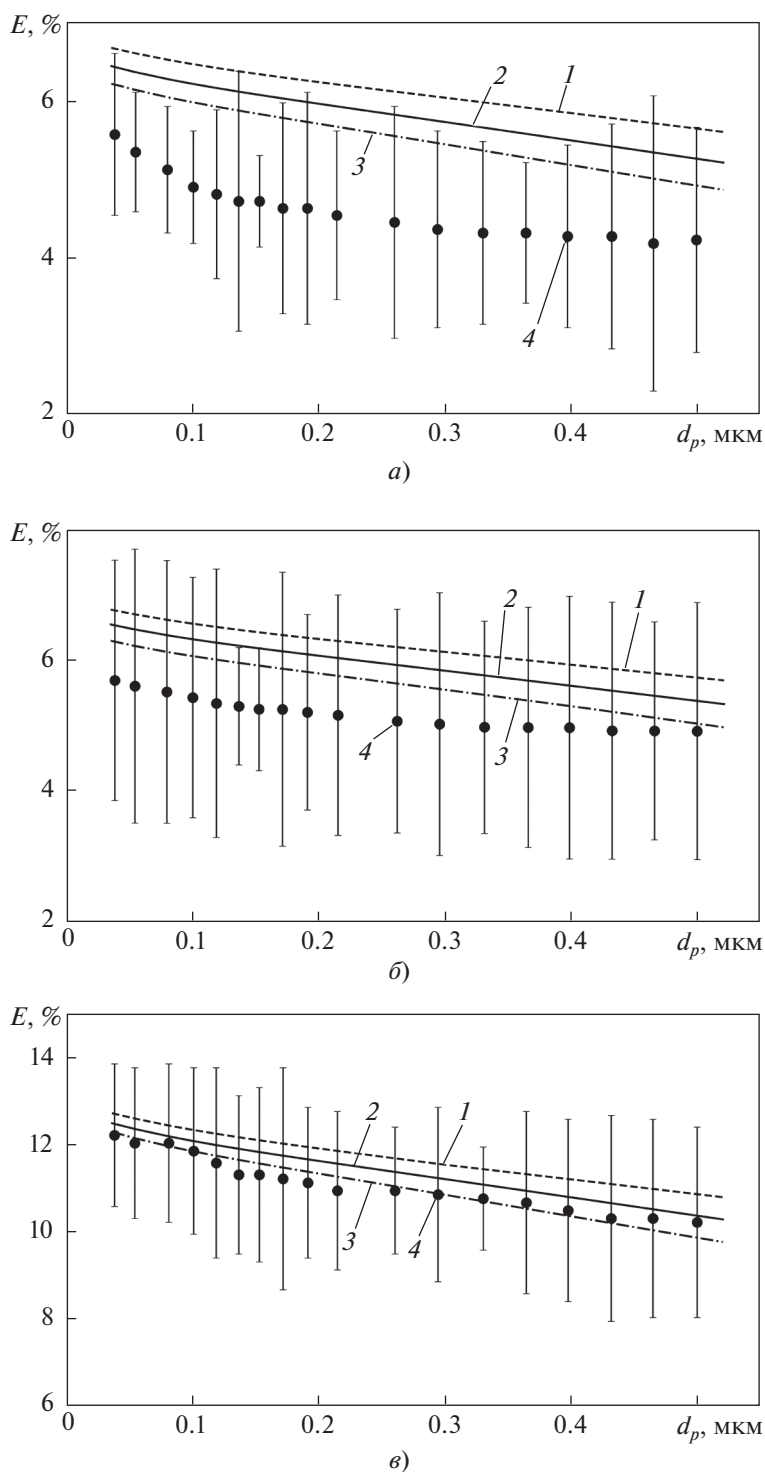


Рис. 4. Зависимость эффективности осаждения частиц от их диаметра при термофорезе в экспериментах № 2 (а), 5(б) и 7 (в).
Обозначения см. рис. 2

холодным. Из полученных данных вычитали вклад в осаждение при броуновской и турбулентной диффузии с целью определить эффективность осаждения вследствие только механизма термофореза. В модельном расчете для достиже-

ния аналогичных условий соответственно исключались механизмы осаждения вследствие диффузии. Результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис. 4. На рисунке видно, что расчетные значения

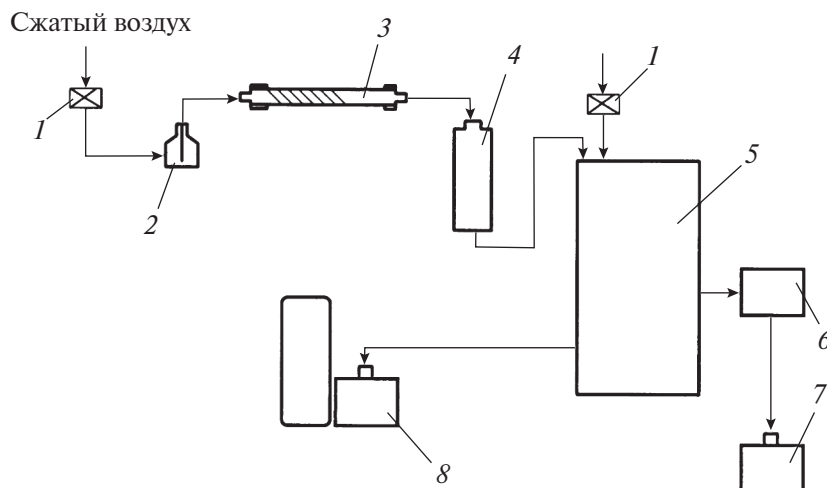


Рис. 5. Схема экспериментальной установки, использованной в работе [17].

1 – фильтр; 2 – атомайзер; 3 – диффузионная сушилка; 4 – электростатический нейтрализатор; 5 – рабочая камера; 6 – бак; 7 – измерительный контур TSI 3934; 8 – конденсационный контур TSI 3762

эффективности осаждения вследствие термофореза находятся в диапазоне погрешности измерений, однако средние расчетные значения немного завышены относительно экспериментальных данных. Возможные причины этого – неоднородность течения и погрешность при моделировании температуры.

Экспериментальная установка, использованная в работе [17], включала в себя цилиндрический бак, изготовленный из акрила, высотой 60 см и диаметром 60 см (рис. 5). Генерация частиц осуществлялась в результате распыления водного раствора NaCl в воздухе, который прокачивали через систему. Воздух с каплями пропускали через сушилку и нейтрализатор для получения

аэрозолей. Образовавшиеся частицы в течение короткого времени поступали в рабочую камеру, в которую был помещен вентилятор для предварительного перемешивания газовой среды и достижения однородной концентрации частиц в объеме. Отбор газа с аэрозолями из бака производился после некоторой выдержки.

Основным результатом эксперимента являлась конечная концентрация частиц в газовом объеме в сравнении с их начальной концентрацией в баке. Измерительная аппаратура состояла из конденсационного контура TSI модели 3762 (для измерения удельной концентрации частиц в пробе газа), а также устройства TSI 3934, предназначенного для измерения размеров частиц.

В табл. 2 приведены следующие параметры экспериментов: средний диаметр частиц $\bar{d}_p$, стандартное отклонение функции распределения частиц σ , продолжительность выдержки t , начальная C_{in} и конечная C_{fin} концентрации частиц.

Результаты многовариантных расчетов для отношения C_{fin}/C_{in} при различных диаметрах частиц в сравнении с экспериментальными данными представлены на рис. 6. Определяющими механизмами осаждения в этом эксперименте являлись броуновская диффузия и седиментация. Во всем диапазоне диаметров частиц наблюдается хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными.

ВЫВОДЫ

1. Результаты валидации аэрозольного модуля на экспериментальных данных по осаждению аэрозолей на поверхность вертикальной трубы из неизотермического ламинарного и турбулентно-

Таблица 2. Параметры экспериментальных исследований, проведенных в работе [17]

$\bar{d}_p$, нм	Параметр			
	σ	t , с	C_{in} , тыс. см ⁻³	C_{fin} , тыс. см ⁻³
24	1.58	178	650	506
30	1.60	181	680	526
45	1.60	186	880	657
50	1.62	188	1230	847
60	1.59	190	1100	799
75	1.63	180	1130	858
80	1.63	185	1180	910
95	1.56	182	980	804
105	1.58	193	1050	861
115	1.59	184	1150	945

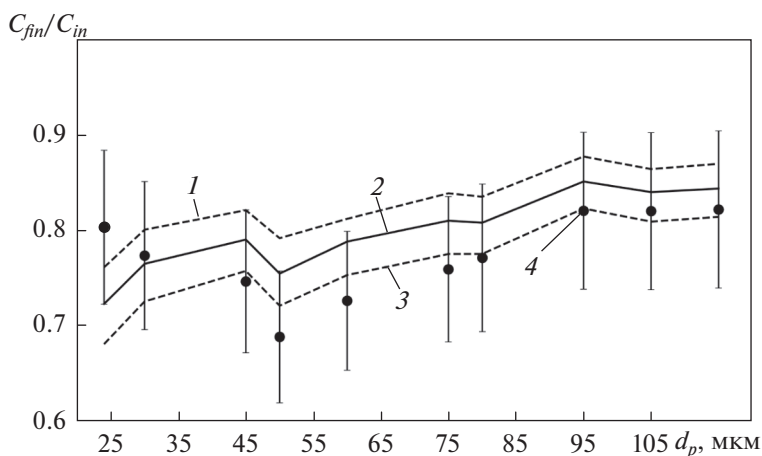


Рис. 6. Зависимость отношения C_{fin}/C_{in} от диаметра частиц в эксперименте при броуновской диффузии и седиментации в качестве определяющих механизмов. Обозначения см. рис. 2

го газового потока и на стенки камеры из неподвижной газовой атмосферы показали, что интегральный код TITAN-2/V1.0 с модулем поведения паров и аэрозолей продуктов деления AERCONT может эффективно использоваться для моделирования переноса и осаждения аэрозолей продуктов деления в газопаровом теплоносителе при разгерметизации трубопроводов I контура ВВЭР и обоснования оценки радиационной безопасности.

2. По результатам валидации модели осаждения аэрозолей для механизмов броуновской и турбулентной диффузии, седиментации и термофореза среднее отклонение расчетных значений от экспериментальных данных с учетом экспериментальных и расчетных неопределенностей составило $[-26; +56]\%$ для осаждения аэрозолей в газовом потоке в трубе и $[-8; +15]\%$ в неподвижном газе в камере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Williams M., Loyalka S.** Aerosol science: Theory and practice with special applications to the nuclear industry. UK, Oxford: Pergamon Press, 1991.
2. **Cousin F.** ASTEC V2 SOPHAEROS module. Theoretical manual. DPAM-SEMIC-181, 2009.
3. **Experimental** and numerical study on the gravitational deposition and coagulation of aerosols / Huiyu Yu, Haifeng Gu, Zhongning Sun, Yanmin Zhou, Junyan Chen, Yingzhi Li // *Front. Energy Res.* 2022. V. 10. Article No. 840503.
4. **Investigations** on aerosol transport and deposition behavior during severe reactor accident / Md. Iqbal Hossan, Kohei Takanishi, Koji Morita, Wei Liu, Xu Cheng // *Mech. Eng. J.* 2024. V. 11. Is. 2. <https://doi.org/10.1299/mej.23-00423>
5. **Aerosol** depositional characteristics in piping assembly under varying flow conditions / A.K. Dwivedi, Arshad Khan, S.N. Tripathi, Manish Joshi, Gaurav Mishra, Dinesh Nath, Naveen Tiwari, B.K. Sapra // *Prog. Nucl. Energy.* 2019. V. 116. P. 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.04.007>
6. **The release** of the simplified radionuclide transport (SRT) code version 2.1 / T. Starkus, D.H. Kam, S. Shahbazi, D. Grabaskas, M. Bucknor // *Nucl. Sci. Eng. Div. ANL/NSE-24/3*, 2024.
7. **Evaluation** of the relative deviation for coagulation and gravitational sedimentation model from experimental results of submicron aerosol in water vapor environments / Junyan Chen, Puzhen Gao, Haifeng Gu, Huiyu Yu // *Prog. Nucl. Energy.* 2023. V. 163. P. 104824.
8. **Improvement** and validation of discrete-sectional method based code for fast reactor aerosol dynamics / S. Sivakumar, A. Jasmin Sudha, V. Subramanian, B. Venkatraman // *Prog. Nucl. Energy.* 2024. V. 177. P. 105457. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105457>
9. **Retention** analysis of aerosol inside narrow channels of the containment / D. Zhang, S. Wang, L. Tong, X. Cao // *Ann. Nucl. Energy.* 2025. V. 211. P. 110987.
10. **Pruppacher H.R., Klett J.D., Wang P.K.** Microphysics of clouds and precipitation. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997. <https://doi.org/10.1080/02786829808965531>
11. **Сорокин А.А.** Моделирование коагуляции аэрозолей продуктов деления // *Атомная энергия.* 2015. Т. 118. Вып. 4. С. 228–232.
12. **Развитие** модели радиолиза воды в модуле AERMOD / Д.С. Сеницын, Д.А. Назаров, О.В. Тарасов, Н.А. Мосунова, А.А. Сорокин // *Теплоэнергетика.* 2022. № 3. С. 31–40. <https://doi.org/10.1134/S0040363622030092>
13. **Моделирование** поведения аэрозолей продуктов деления в защитной оболочке / Д.А. Назаров, Д.С. Сеницын, Н.А. Мосунова, А.А. Сорокин // *Теплоэнергетика.* 2022. № 9. С. 57–65. <https://doi.org/10.56304/S0040363622090028>
14. **Модель** образования наночастиц оксидов йода в объеме защитной оболочки / Д.С. Сеницын,

- Д.А. Назаров, Н.А. Мосунова, А.А. Сорокин // Теплоэнергетика. 2024. № 11. С. 38–47.
<https://doi.org/10.56304/S0040363624700413>
15. Seinfeld J.Y., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics. N.Y.: Wiley, 1998.
 16. Thermophoretic deposition of particles in laminar and turbulent tube flows / C.-J. Tsai, J.-S. Lin, S.G. Aggarwal, D.-R. Chen // Aerosol Sci. Technol. 2004. V. 38. P. 131–139.
<https://doi.org/10.1080/02786820490251358>
 17. 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)
 18. РБ-166-20. Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций. М.: Ростехнадзор, 2020.
 19. Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer. ASME V&V 20, 2009.
 20. Uniform approach to validation of codes in application for conservative and realistic accidents modeling / E. Moiseenko, N. Mosunova, V. Strizhov, D. Synitsyn // BEPU-2024: Best Estimate Modelling Plus Uncertainties in Safety Analyses. Lucca, Italy, 19–24 May 2024.

Validation Results of the AERCONT Aerosol Module of the TITAN-2/V1.0 Integrated Computer Code in Regard of Fission Product Aerosol Deposition Models

D. S. Sinitsyn^{a, *}, D. A. Nazarov^a, O. V. Tarasov^a, N. A. Mosunova^a, and A. A. Sorokin^{a, **}

^a Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences (IBRAE RAS), Moscow, 115191 Russia

*e-mail: synitsyn@ibrae.ac.ru

**e-mail: sorokin@ibrae.ac.ru

Abstract—Safe operation of nuclear reactors depends in many respects on the insight into and prediction accuracy of the processes through which the fission product aerosols are generated, transferred, and deposited in the course of possible accidents. Aerosols are finely dispersed particles produced as a result of destruction of nuclear fuel and structural materials in the reactor core. They may be transferred with a gas and vapor flow; they can deposit on various surfaces and cause radioactive contamination of equipment and rooms. The article presents the results from verification and validation of the aerosol particle deposition model in the AERCONT aerosol module in the composition of the TITAN-2/V1.0 integrated computer code developed for calculating the behavior of gases, vapors, and fission product aerosols in the gas–vapor coolant in the primary circuit and rooms of the containment of an NPP with a reactor based on the VVER technology. The deposition of fission product aerosols determines the occurrence and accumulation of radioactive deposits on the walls of the process circuit and rooms. Therefore, validation of models for calculating this process is necessary and is of practical interest from the viewpoint of radiation safety. The article presents a brief description of the model simulating the behavior of multicomponent and polydispersed fission product aerosols, methods for numerically solving the system of differential equations, and a comparison of the model with similar approaches. The results of validating the particle deposition model against experimental data are given. Particle sizes, temperature gradients, and flow regime have an effect on the deposition rate, which are of crucial importance for assessing the contamination sources and elaborating efficient strategies for mitigating the consequence during the evolution of accidents at NPPs.

Keywords: fission products, aerosol particles, multicomponent composition, aerosol deposition, Brownian and turbulent diffusion, validation, integrated code, containment