

УДК 519.6+51-74::628.395

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЛАЖНОГО ОСАЖДЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ DERMA

Убайдуллаев М.Ш.

ubaydullayev@samtuit.uz

Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта,

100125, Узбекистан, г. Ташкент, м-в Буз-2, д. 17А.

В работе исследуется процесс влажного осаждения радиоактивных примесей, включающий их взаимодействие с дождем, снегом и туманом. Представлены математические модели, описывающие процесс осаждения, основанные на данных мезо-макромасштабной модели DERMA. Проведен анализ влияния метеорологических условий и размера частиц на их траекторию и расстояние осаждения. На основе данных метеостанции Самарканда за 2023 год выполнены расчеты осаждения частиц различного размера с использованием разработанной методики. Результаты вычислений демонстрируют значимость учета метеорологических факторов и размера частиц для прогнозирования загрязнения атмосферы и планирования мероприятий по снижению их воздействия.

Ключевые слова: загрязнения воздуха, влажное осаждение, прогнозирование, модель DERMA, радиоактивные примеси.

Цитирование: Убайдуллаев М.Ш. Моделирование процесса влажного осаждения радиоактивных примесей в атмосфере с использованием модели DERMA // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – № 6(62). – С. 91-104.

1 Введение

В современном мире задача прогнозирования загрязнения воздуха является одной из актуальных проблем для мегаполисов и промышленных регионов, где концентрация выбросов загрязняющих веществ представляет серьезную угрозу для экосистем и здоровья населения [1]. Значимость этой проблемы еще больше возросла в последние годы из-за радиоактивного загрязнения вокруг атомных электростанций. По мере расширения строительства новых ядерных объектов по всему миру увеличивается и потребность в математических моделях для прогнозирования рассеивания радиоактивных элементов в атмосфере [2]. Эти модели играют важную роль в снижении потенциального воздействия как на окружающую среду, так и на здоровье человека. Кроме того, они предоставляют ценную информацию о том, как ведет себя загрязнение воздуха при различных погодных условиях и в различных географических зонах. Научное сообщество активизировало свои исследования в этой области, признавая растущую важность таких моделей для обеспечения готовности к чрезвычайным ситуациям и соблюдения нормативных требований, особенно в свете растущего числа строящихся и вводимых в эксплуатацию атомных электростанций по всему миру. Уроки извлеченные из прошлого, аварии на Three Mile Island (Три-Майл-Айленд) в США [3], разрыва трубы Mihama SG в Японии [4], чернобыльской катастрофы в России [5] и аварии на АЭС Фукусима-1 в Японии [6] привели к длительным дебатам по вопросам сохранения экологической чистой окружающей среды для будущего населения планеты. К настоящему времени предложено большое количество моделей

распространения вредных веществ в атмосфере. Авторы [7] представили обзорный доклад по моделированию качества воздуха, где рассмотрели методы математического моделирования Бокса, Гаусса, Эйлера, Лагранжа, представили свои выводы о будущем математического моделирования качества воздуха.

В исследовании [8] со стороны авторов обсуждены вопросы разработки простой лагранжевой модели и алгоритма решения задачи распространения частиц, выбираемых стационарным точечным источником с учетом влияния эффектов гравитационного осаждения, радиоактивного распада и рельефа местности. Рассмотрен возможность оценки пространственного распределения концентрации взвешенных и осажденных частиц в заданном диапазоне времени, которое позволяет изучать различные сценарии влияния выбросов вредной примеси на окружающую среду, как в городских, так и в сельских условиях.

В работе [9] рассмотрены модели рассеивания тяжелых газов в атмосфере, в котором разработали специальные модели. Модели рассеивания тяжелых газов различаются по сложности и математическому описанию, на основе которых выделены четыре основные группы моделей: простые/эмпирические модели, промежуточные/интегральные и модели мелкого слоя, продвинутое/модели траектории лагранжевых частиц и дисперсии лагранжевых порывов и сложные/модели компьютерной гидродинамики (CFD).

Ученые из Венгрии и США в своей работе [10] провели краткий обзор математического моделирования рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, где обсудили преимущества и недостатки нескольких инструментов и стратегий моделирования, а именно гауссовых, лагранжевых, эйлеровых и CFD-моделей. Они особенно фокусировались на нескольких последних достижениях в этой многопрофильной области исследований, таких как параллельные вычисления с использованием графических процессоров или адаптивное сеточное уточнение.

Исследование [11] является предоставление всестороннего теоретического обзора истории, существующих подходов, последних разработок, основных исследований, связанных с ними вычислительных методов и приложений моделей качества воздуха, где авторы охватили широкий спектр тем, с упором на источники загрязнения воздуха, первичные и вторичные загрязнители, химию атмосферы, модели переноса химических веществ в атмосфере, компьютерные программы для моделирования дисперсии, онлайн и офлайн моделирование качества воздуха, ассимиляцию данных, параллельные вычисления, приложения географической информационной системы в моделировании качества воздуха, индекс качества воздуха, а также использование спутниковых и дистанционных данных зондирования в моделировании качества воздуха. Провели несколько сравнительных резюме различных моделей, используемых в исследовании качества воздуха.

Рассеивание и выброс загрязняющих веществ в воздух контролируются преобладающими метеорологическими условиями, такими как профиль ветра, температурный профиль и стабильность атмосферы. Модели рассеивания загрязнения воздуха пытаются выразить взаимосвязи этих факторов в терминах математических уравнений. Авторы [12] рассмотрели множество моделей для прогнозирования концентрации загрязняющих веществ в воздухе на уровне земли, где различили исходя от применимости (например, в объектах разработки и других источниках загрязнения воздуха, принятии нормативных решений и экологическом планировании). Исследовали теорию моделирования загрязнения воздуха и критически оценили важные модели рассеивания загрязнения воздуха. Описали основные типы моделей загрязне-

ния воздуха вместе с их преимуществами и недостатками. Особое внимание уделили применимости моделей и их возможности для модификаций и пересмотров.

Статья [13] посвящена исследованию оценке текущего состояния математического моделирования рассеивания, переноса и трансформации загрязняющих веществ в воздухе с акцентом на типы методов моделирования, которые могут быть легко применены для поддержки принятия экологических решений. Рассмотрены детерминированные математические модели рассчитывают концентрации загрязняющих веществ на основе данных об инвентаризации выбросов и метеорологических переменных в соответствии с решениями различных уравнений, которые представляют соответствующие физические процессы. Гауссовские модели, несмотря на ряд ограничений и допущений, нашли признание в научном сообществе, поскольку они очень просты и включают решение простого гауссова уравнения. Помимо их удобной для пользователя природы и простоты, эти модели концептуально привлекательны, поскольку они согласуются со случайной природой турбулентности атмосферы.

В работе [14] рассмотрен широкий спектр загрязняющих веществ в атмосфере, чтобы предотвратить загрязнение и изучить их влияние, исследовано несколько теорий и стратегий, которые могут дать использование виртуальных результатов в соответствии с указанной датой с предопределенными условиями и ограничениями, которые включены в них. Изучены и сопоставлены широко используемые модели - модель Бокса, Гаусовская модель, Эйлеровая модель, Лагранжовая модель, модель CFD. В статье каждая модель кратко описывалась и обсуждалась, обсуждались собственные постулаты и недостатки, как они не могут точно предсказать воздействие на окружающую среду.

В монографии [15] рассмотрены значимые экологические и социальные программы, в решении существующих проблем и, во-вторых, в разработке долгосрочных целей по защите окружающей среды в мире. Рассматривается исследования конкретных случаев, которые проводились в Анкаре (Турция); Франкфурте (Германия); Сент-Луисе (США); Осло (Норвегия); и регионе Южная Голландия (Нидерланды).

В настоящей статье рассмотрена влияние влажного осаждения частиц в процессе атмосферного переноса и диффузии радиоактивных примесей, используя модель DERMA [16, 17].

2 Постановка задачи

Влажное осаждение частиц представляет собой важный процесс, влияющий на перенос и диффузию различных загрязняющих веществ, в том числе радиоактивных примесей, этот процесс происходит, когда атмосферные частицы, такие как аэрозоли, пыль или радиоактивные вещества, взаимодействуют с каплями дождя или других форм осадков. Осадки, проходя через атмосферу, захватывают частицы, что в итоге приводит к осаждению частиц на поверхность земли. Таким образом, влажное осаждение служит природным механизмом, который позволяет снижать концентрацию загрязняющих веществ в атмосфере, предотвращая их дальнейшее распространение [16].

Основное уравнение процесса атмосферного переноса и диффузии радиоактивных примесей в атмосфере с учетом влажного осаждения имеет следующий вид [18–22]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \theta}{\partial z} + (\sigma + \alpha + k_r + \Lambda) \theta = \\ = \mu \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \delta Q. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение (1) сопровождаем начальным:

$$\theta|_{t=0} = \theta^0 \quad (2)$$

и граничными условиями:

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi (\theta_E - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi (\theta_E - \theta); \quad (3)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi (\theta_E - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi (\theta_E - \theta); \quad (4)$$

$$-\varkappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta \theta - f_0); \quad \varkappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H_z} = \xi (\theta_E - \theta). \quad (5)$$

Здесь θ – концентрация радиоактивных примесей в атмосфере, θ^0 – начальная концентрация, θ_E – концентрация, поступающая через границы рассматриваемой территории, x, y, z – система координат, u, v, w – скорость ветра в трех направлениях, w_g – скорость осаждения частиц, σ – коэффициент атмосферного поглощения, α – коэффициент, характеризующий захват частиц элементами растительности, k_r – коэффициент радиоактивного распада ($k_r = \ln 2 / T_{1/2}$, $T_{1/2}$ – период полураспада исследуемого радионуклида), μ, \varkappa – коэффициенты диффузии и турбулентности соответственно, Q – источник радионуклидов, δ – функция Дирака, f_0 – поднятие частиц в атмосферу с подстилающей поверхности земли, β – коэффициент взаимодействия частицы с поверхностью, ξ – параметр уменьшения размерности, L_x, L_y – длина и ширина рассматриваемой площади соответственно, H_z – высота АПС, Λ – коэффициент влажного осаждения.

Для нахождения величины влажного осаждения будем использовать методику, используемой в мезо-макромасштабной Датской модели реагирования на чрезвычайные ситуации в атмосфере (Danish emergency response model of the atmosphere) DERMA [16, 17]:

$$\Lambda = \Lambda_w + \Lambda_s + \Lambda_r, \quad (6)$$

где Λ_w – коэффициент осаждения, который соответствует вымыванию загрязняющей примеси дождем (washout);

Λ_s – коэффициент осаждения, который соответствует вымыванию загрязняющей примеси снегом (snow scavenging);

Λ_r – коэффициент осаждения, который соответствует растворению радионуклидов в тумане и облачности с последующим осаждением (rainout).

Коэффициенты Λ_w, Λ_s и Λ_r вычислим, используя следующие формулы (7), (8), (9) ?:

$$\Lambda_w(r, q) = \begin{cases} a_0 \cdot q^{0.79} & \text{если } r \leq 1,4 \text{ (мкм)}, \\ (b_0 + b_1 r + b_2 r^2 + b_3 r^3) f(q) & \text{если } 1,4 < r \leq 10 \text{ (мкм)}, \\ f(q) & \text{если } r \geq 10 \text{ (мкм)}, \end{cases} \quad (7)$$

$$f(q) = a_1 q + a_2 q^2,$$

где q – скорость выпадения осадков ($мм/час$), r – характерный размер загрязняющей частицы ($мкм$) и параметры [23]:

$$\begin{aligned} a_0 &= 8.4 \times 10^{-5}, \quad a_1 = 2.7 \times 10^{-4}, \quad a_2 = -3.618 \times 10^{-6}, \\ b_0 &= -0.1483, \quad b_1 = 0.322, \quad b_2 = -3.006 \times 10^{-2}, \quad b_3 = 9.344 \times 10^{-4}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Lambda_s(q) = a_0 q^b,$$

где,

$$a_0 = 8.0 \times 10^{-5},$$

$$b = \begin{cases} 0.305, & z \leq H_r, \\ 0.79, & H_r < z < H, \end{cases}$$

H_r – высота облаков, H – высота пограничного слоя.

$$\Lambda_r(q) = a_0 q^{0.79}, \quad (9)$$

где $a_0 = 3.36 \times 10^{-4}$ [24].

3 Метод решения

Осаждение частицы соответствующую вымыванию дождем рассчитаем, используя (7) и уравнением перемещения для равноускоренного движения при условии покоя частиц [26]:

$$y(t) = h_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \Lambda_w(r, q) \cdot g \cdot t^2, \quad (10)$$

где $y(t)$ – вертикальная координата в момент t , h_0 – начальная вертикальная координата, v_0 – начальная скорость (у нас она равна нулю по условию покоя частиц в атмосфере), t – время в секундах и $g \approx 9.8 \text{ м/с}^2$.

Осаждение частицы соответствующую вымыванию снегом подставляя (8) будет иметь следующий вид:

$$y(t) = h_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \Lambda_s(q) \cdot g \cdot t^2. \quad (11)$$

Осаждение частицы в тумане и облачности подставляя (9) будет иметь следующий вид:

$$y(t) = h_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \Lambda_r(q) \cdot g \cdot t^2. \quad (12)$$

Уравнение расчета общей величины влажного подставляя (6) будет иметь следующий вид:

$$y(t) = h_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \Lambda \cdot g \cdot t^2. \quad (13)$$

4 Анализ и обсуждение результатов

Вычислительные эксперименты влажного осаждения модели DERMA проводились на основе реальных данных города Самарканда Республики Узбекистан за 2023 год от метеостанции Самарканд (аэропорт), Узбекистан (таблица 1) [25].

Таблица 1 Количество осадков за 2023 год метеостанция Самарканд (аэропорт), Узбекистан [25]

№	Месяцы	Дождь (мм/мес.)	Снег (мм/мес.)	Туман и облачность (мм/мес.)	Общее количество (мм/мес.)
1	Январь	9,6	79,1	2,1	90,8
2	Февраль	93,4	16,6	2,5	112,5
3	Март	32,2	0,0	5,2	37,4
4	Апрель	39,7	0,0	3,2	42,9
5	Май	50,2	0,0	0,0	50,2
6	Июнь	3,5	0,0	0,0	3,5
7	Июль	3,8	0,0	0,0	3,8
8	Август	11,9	0,0	0,0	11,9
9	Сентябрь	5,1	0,0	1,4	6,5
10	Октябрь	40,2	0,0	2,6	42,8
11	Ноябрь	77,2	0,0	5,0	82,2
12	Декабрь	24,1	9,2	0,8	34,1
Итого за 2023 год (мм/год)		390,9	104,9	22,8	518,6



Рис. 1 Средняя скорость выпадения дождя (мм/час) по месяцам за 2023 год

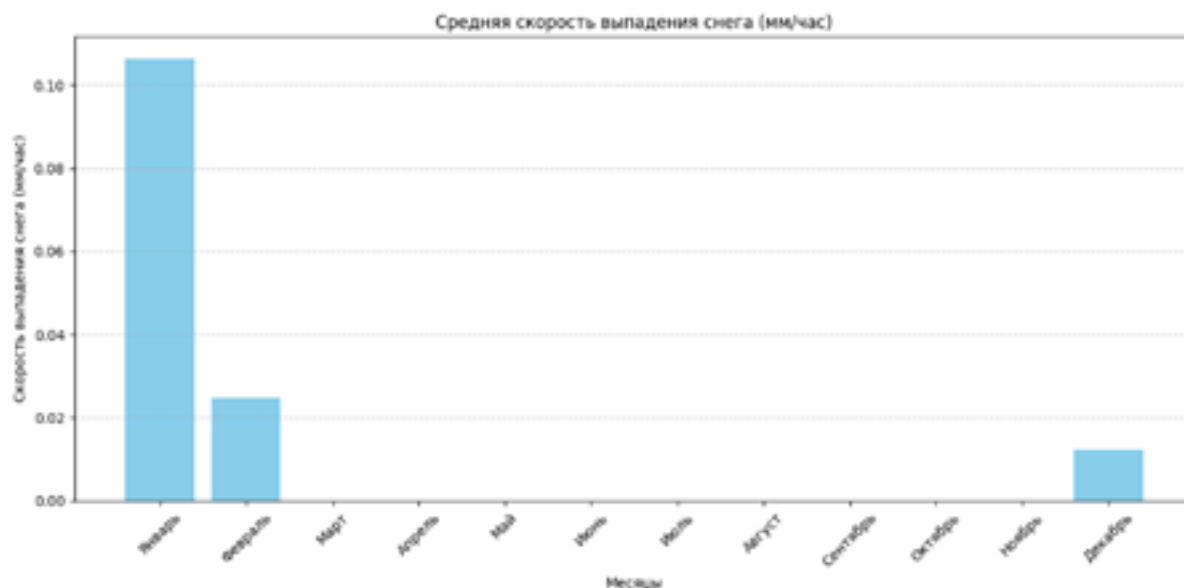


Рис. 2 Средняя скорость выпадения снега (мм/час) по месяцам за 2023 год

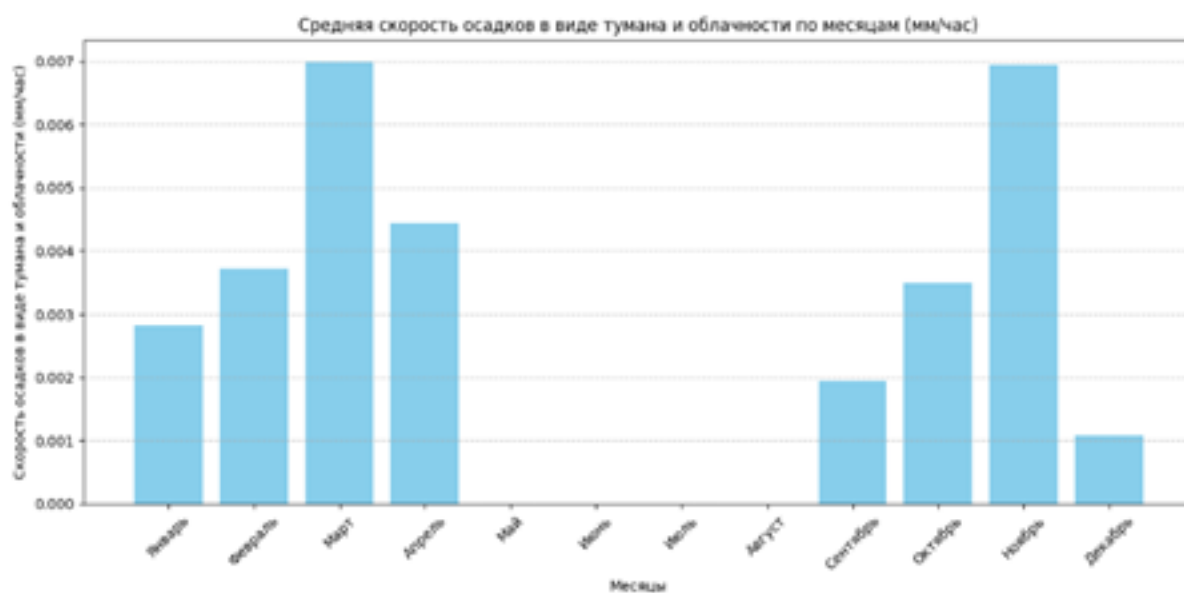


Рис. 3 Средняя скорость осадков в виде тумана и облачности (мм/час) по месяцам за 2023 год

Как видно из рис. 1 за 2023 год осадки в виде дождя наблюдались ежемесячно на протяжении всего года, но в феврале месяце наблюдалась самая наибольшая средняя скорость выпадения, а летние месяцы особенно июнь и июль характеризуется минимальной скоростью выпадения дождя, теперь используя (7) проведем расчеты вымывания загрязняющей частицы дождем.

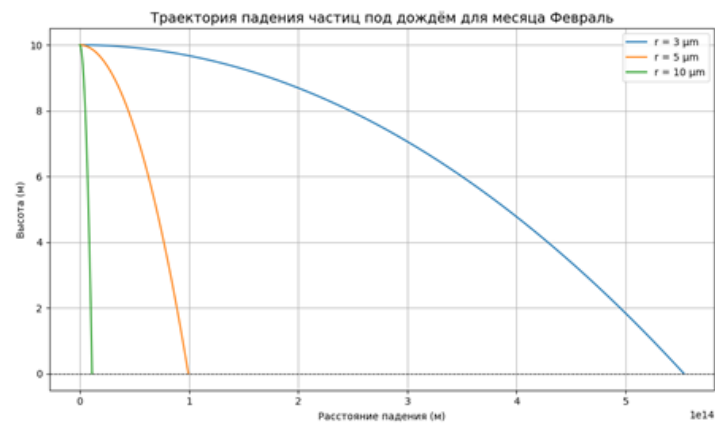


Рис. 4 Расстояние осаждения частицы при размерах $r = 3, r = 5, r = 10$ мкм, с высоты 10 м, со скоростью выпадения дождя $q \approx 0,14$ мм/час

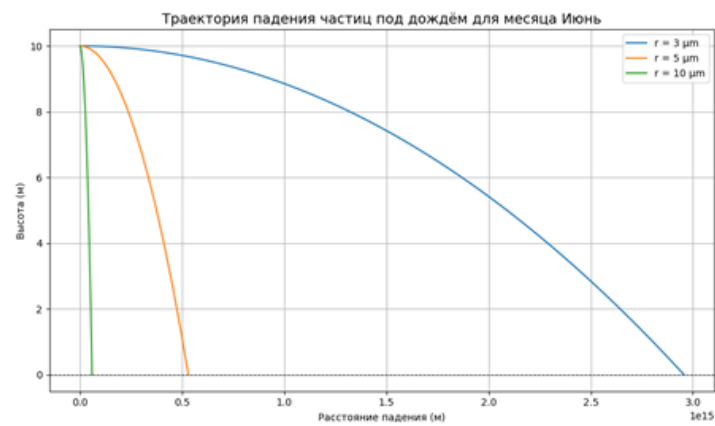


Рис. 5 Расстояние осаждения частицы при размерах $r = 3, r = 5, r = 10$ мкм, с высоты 10 м, со скоростью выпадения дождя $q \approx 0,005$ мм/час

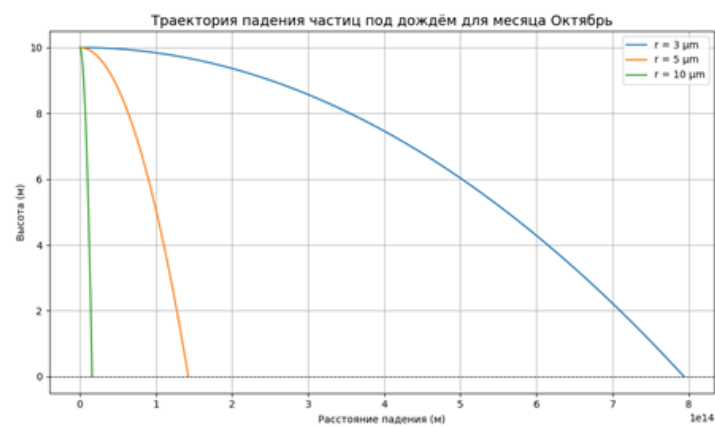


Рис. 6 Расстояние осаждения частицы при размерах $r = 3, r = 5, r = 10$ мкм, с высоты 10 м, со скоростью выпадения дождя $q \approx 0,7$ мм/час

Как видно из рис. 4–6, влиянием дождевых осадков в феврале частицы размеров $r = 3, r = 5, r = 10 \text{ мкм}$, проходят меньшие горизонтальные расстояния чем в остальных месяцах, например частицы размера $r = 3$ достигает $5,5 \times 10^{14} \text{ м}$, а это же частица в июне месяце перемещается гораздо дальше по горизонтали которая достигает примерно $3,0 \times 10^{15} \text{ м}$, что в 6 раз больше, чем в феврале, а в октябре расстояние падения частицы немного больше чем в феврале месяце примерно $8,0 \times 10^{14} \text{ м}$.

При этом можно отметить то, что размер частицы тоже играет не маловажную роль в осаждении так как мелкие частицы проходят большие расстояния чем частицы крупных размеров.

На рис. 2 показаны осадки в виде снега за 2023 год, в котором можно увидеть, что снежные осадки наблюдались только в 3 месяцах, это январь, февраль и декабрь, а в январе можно увидеть самую наибольшую среднюю скорость выпадения снега, чем в феврале и декабре, далее с помощью (8) проведем расчеты вымывания загрязняющей частицы снегом.

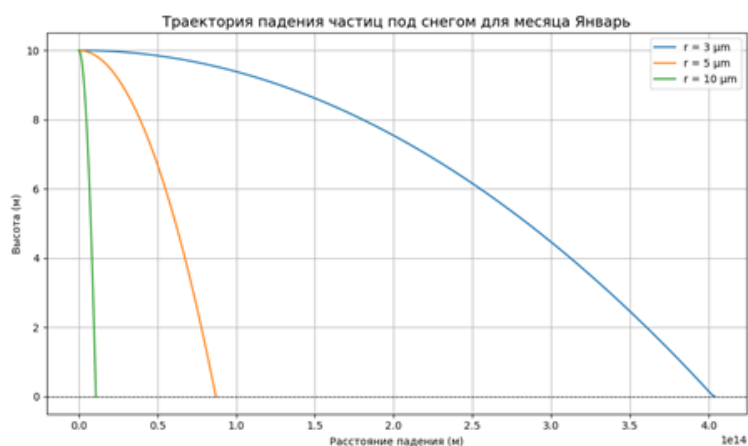


Рис. 7 Расстояние осаждения частицы при размерах $r = 3, r = 5, r = 10 \text{ мкм}$, с высоты 10 м, со скоростью выпадения снега $q \approx 0,11 \text{ мм/час}$

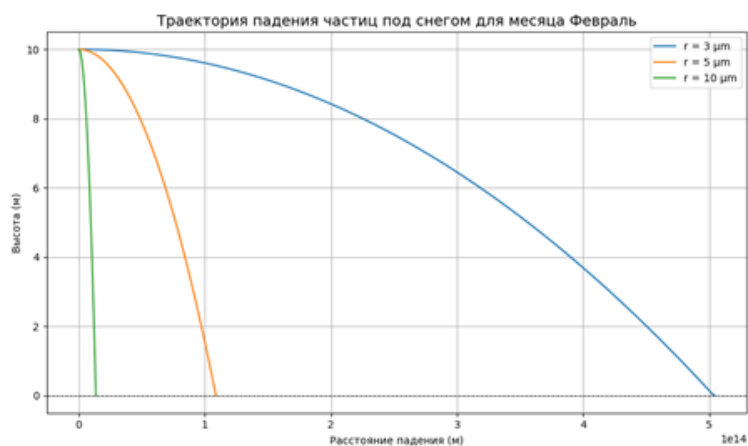


Рис. 8 Расстояние осаждения частицы при размерах $r = 3, r = 5, r = 10 \text{ мкм}$, с высоты 10 м, со скоростью выпадения снега $q \approx 0,02 \text{ мм/час}$

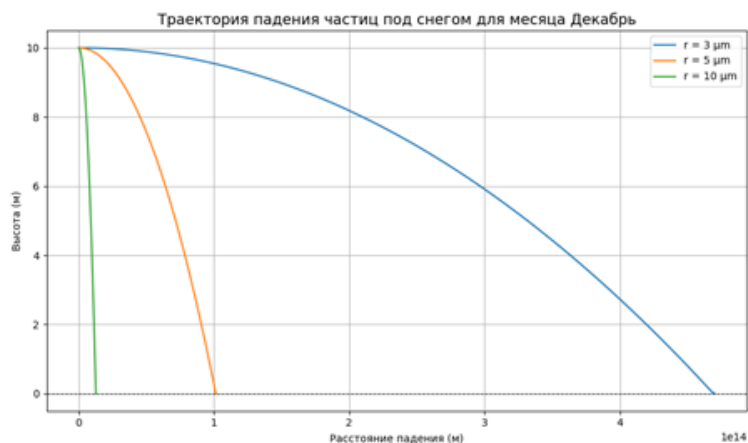


Рис. 9 Расстояние осаждения частицы при размерах $r = 3, r = 5, r = 10$ мкм, с высоты 10 м, со скоростью выпадения снега $q \approx 0,04$ мм/час

На рис. 7–9 иллюстрируются влияние осадков в виде снега на осаждение частиц, из рисунков видно, что в январе месяце частицы размеров $r = 3, r = 5, r = 10$ мкм, проходят меньшие горизонтальные расстояния чем в феврале и декабре месяце, например частицы размера $r = 3$ достигает примерно $4,0 \times 10^{14}$ м, а это же частица в февраль месяце перемещается дальше по горизонтали которая достигает примерно $5,0 \times 10^{14}$ м, а в декабре расстояние падения частицы примерно $4,7 \times 10^{14}$ м.

Как было с осаждением с помощью дождя тут тоже можно отметить, что размер частицы играет большую роль в осаждении, тут тоже можно увидеть, что мелкие частицы проходят больше расстояния чем частицы крупных размеров.

Рис. 2 показаны осадки в виде тумана и облачности за 2023 год, в котором можно наблюдать то, что самая наибольшая средняя скорость выпадения осадков в виде тумана и снега приходит на март и ноябрь месяцы, а с мая по август месяцы туманность и облачность было примерно равно нулю, далее проведем расчеты растворения частиц в тумане и облачности с последующим осаждением используя (9).

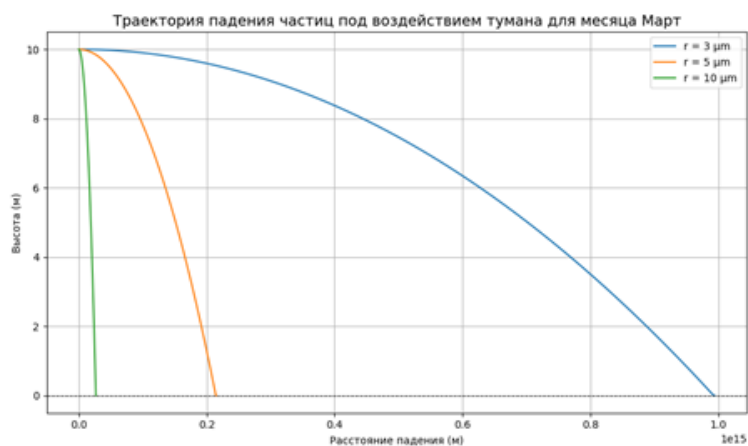


Рис. 10 Расстояние осаждения частицы при размерах $r = 3, r = 5, r = 10$ мкм, с высоты 10 м, со скоростью выпадения осадков в виде тумана и облачности $q \approx 0,007$ мм/час

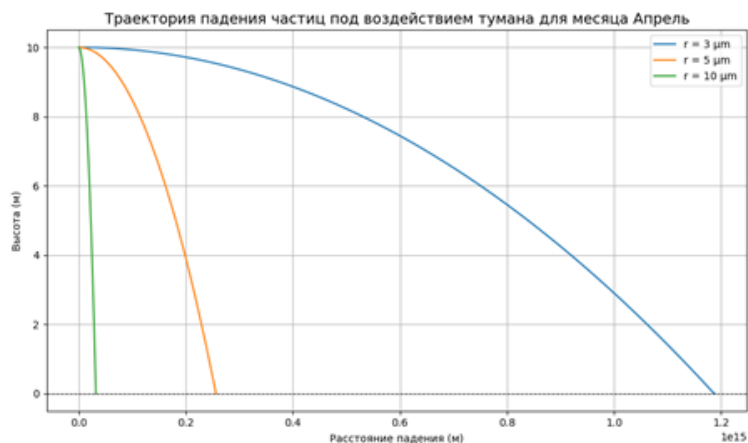


Рис. 11 Расстояние осаждения частицы при размерах $r = 3, r = 5, r = 10$ мкм, с высоты 10 м, со скоростью выпадения осадков в виде тумана и облачности $q \approx 0,004$ мм/час

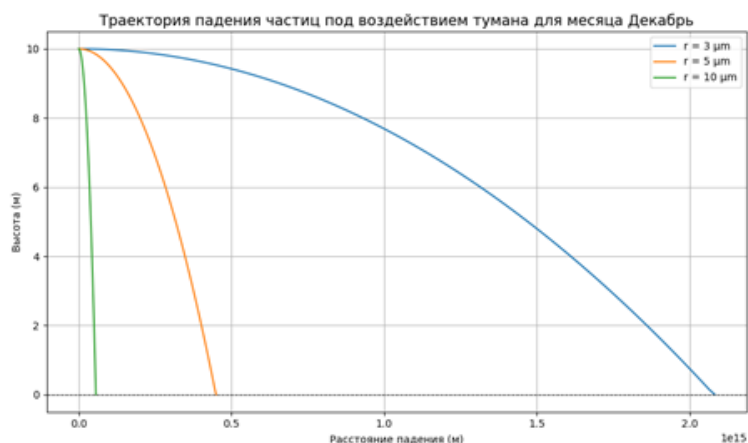


Рис. 12 Расстояние осаждения частицы при размерах $r = 3, r = 5, r = 10$ мкм, с высоты 10 м, со скоростью выпадения осадков в виде тумана и облачности $q \approx 0,001$ мм/час

Рис. 10–12 демонстрируют влияние осадков в виде тумана и облачности на осаждение частиц, как видно, из графиков в март месяц частицы размеров $r = 3, r = 5, r = 10$ мкм, проходят меньше расстояние чем в апреле и декабре, например частицы размера $r = 3$ достигает примерно $1,0 \times 10^{15}$ м, а в апреле достигает примерно $1,2 \times 10^{15}$ м, за декабрь месяц средняя скорость осадков в виде тумана и облачности достигло $q \approx 0,001$ мм/час, тогда расстояние падения частицы составило примерно $2,1 \times 10^{15}$ м, как во всех остальных случаях тоже можно отметить, что размер частицы играет немало важную роль в осаждении, тут тоже можно увидеть, что мелкие частицы проходят больше расстояния чем частицы крупных размеров.

5 Заключение

В результате проведенного исследования разработана методика моделирования влажного осаждения радиоактивных примесей с использованием модели DERMA. Выполненный анализ показал, что интенсивность осадков и размеры частиц оказывают значительное влияние на траекторию их осаждения. На основе реальных

метеорологических данных за 2023 год выявлено, что осаждение частиц наиболее эффективно в зимние месяцы, когда осадки, особенно в виде снега и дождя, играют ключевую роль в вымывании примесей. Летние месяцы характеризуются минимальным осаждением из-за низкой интенсивности осадков. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере, а также для планирования мер по снижению их концентрации в случае радиационных аварий.

Литература

- [1] *Ravshanov N. et al.* Modelling the Spatial Distribution of Industrial Facilities and Green Areas to Reduce the Ecological Footprint // – E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, – 2024. – Vol. 574.
- [2] *Муратова Г.В., Глушанин М.В.* Исследование процессов переноса, диффузии и трансформации радиоактивных примесей, поступающих в атмосферу при авариях на объектах энергетики // Вычислительные технологии. – Том 14. – № 2. – 2009. – С. 85–97.
- [3] *McEvily, A. J., May, I. L.* The Accident at Three Mile Island // Journal of the Society of Materials Science. Japan, 51(3Appendix), – 2002. – P. 1–8. doi:10.2472/jsms.51.3appendix1.
- [4] *Tamaki Tomohiko, Ohtani Masanori, Kawabe Yasuharu* Mihama Unit 2 Steam Generator Tube Rupture Analysis // Nuclear Technology. – 1999. – P. 216–224. doi:10.13182/NT99-A3026.
- [5] *Saenko, V., Ivanov, V., Tsyb, A., Bogdanova, T., Tronko, M., Demidchik, Y., Yamashita, S.* The Chernobyl Accident and its Consequences // Clinical Oncology. – 2011. – P. 234–243. doi:10.1016/j.clon.2011.01.502.
- [6] *Hayashi, Masatsugu; Hughes, Larry* The Fukushima nuclear accident and its effect on global energy security // Energy Policy. – 2013. – P. 102–111. doi:10.1016/j.enpol.2012.11.046.
- [7] *Collett R., Oduyemi K.* Air quality modelling: a technical review of mathematical approaches // Meteorological Applications. – 1997. – Vol. 4. – P. 235–246.
- [8] *Ахмедов Д.Д., Убайдуллаев М.Ш., Насруллаев П.А.* Простая лагранжева модель распространения радиоактивных частиц в атмосфере // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – №1(55). – С. 26–47.
- [9] *Markiewicz M.* A Review of Mathematical Models for the Atmospheric Dispersion of Heavy Gases. Part I. A Classification of Models // Ecological Chemistry and Engineering. – 2012. – Vol. 19. – P. 297–314.
- [10] *Leelossy A., Molnar F., Izsak F., Havasi A., Lagzi I., Meszaros R.* Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review // Central European Journal of Geosciences. – 2014. – Vol. 6. – P. 257–278.
- [11] *El-Harbawi M.* Air quality modelling, simulation, and computational methods: a review // Environmental Reviews. – 2013. – Vol. 21. – P. 149–179.
- [12] *Srivastava S., Sinha I.* Classification of air pollution dispersion models: a critical review // Proc. of the National Seminar on Environmental Engineering with special emphasis on Mining Environment. – Dhanbad, – 2004. – P. 1–11.
- [13] *Aggarwal A., Haritash A.K., Kansal G.* Air pollution modelling– a review // – International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science.– 2014. – Vol. 2. – Issue 6. – P. 355–364.
- [14] *Modi M., Ramachandra V., Ahmed L., Hussain Z.* A review on theoretical air pollutants dispersion models // International journal of pharmaceutical, chemical and biological sciences. – 2013. – Vol. 3. – Issue 4. – P. 1224–1230.

- [15] *Weber E.* Air Pollution: Assessment Methodology and Modeling // New York: Springer Verlag, – 2013. – 330 p.
- [16] *Sørensen J.H.* Sensitivity of the DERMA long-range Gaussian dispersion model to meteorological input and diffusion parameters. // Atmospheric Environment. – Volume 32. Issue 24. – 1998. – P. 4195–4206. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00178-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00178-2)
- [17] *Sørensen J.H., Baklanov A., Hoe S.* The Danish emergency response model of the atmosphere (DERMA) // Journal of Environmental Radioactivity. – Volume 96. – Issues 1–3. – 2007. – P. 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.01.030>.
- [18] *Ravshanov N., Akhmedov D., Roziyeva G.* GIS based estimation of the vertical wind profile effect on air pollutants disperse in the atmosphere. AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2781. – Issue 1. DOI: 10.1063/5.0144801.
- [19] *Sharipov D., Akhmedov D., Boborakhimov B., Sharipov Kh.* Modelling of fine aerosols diffusive transport in the atmosphere // International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities. Tashkent, – 2022. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICISCT55600.2022.10146840.
- [20] *Sharipov D., Akhmedov D.* Aggregation of Meteorological and Spatial Data for Air Pollution Modeling // International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities. Tashkent, – 2021. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICISCT52966.2021.9670325.
- [21] *Ravshanov N., Akhmedov D., Kravets O.Ja.* Atmospheric dispersion modeling in ecological engineering problems // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062017.
- [22] *Ахмедов Д., Боборахимов Б., Убайдуллаев М., Насруллаев П.* Параллельный алгоритм расчета поля приземной концентрации загрязняющей примеси в атмосфере // Международный Журнал Теоретических и Прикладных Вопросы Цифровых Технологий. – 2024. – 7(3), – С. 19–32. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v7i3.193>
- [23] *Baklanov, A., Sørensen, J.H.* Parameterisation of radionuclide deposition in atmospheric dispersion models // Phys. Chem. Earth 26, – 2001. – P. 787–799.
- [24] *Crandall W.K., Molenkamp C.R., Williams A.L., Fulk M.M., Lange R., Knox J.B.* An investigation of scavenging of radioactivity from nuclear debris clouds: research in progress // Report UCRL 51328, Lawrence Liver more National Laboratory, CA, USA. – 1973. – P. 1–38.
- [25] Архив метеостанции Самарканд (аэропорт), Узбекистан, выборка с 01.01.2023 по 31.12.2023, http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=38698&lang=ru
- [26] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Физика // Основы механики. М.: Наука, (Теоретическая физика; т. 1). – Т. 1. – 1988.

Поступила в редакцию 18.11.2024

UDC 519.6+51-74::628.395

MODELING THE PROCESS OF WET DEPOSITION OF RADIOACTIVE IMPURITIES IN THE ATMOSPHERE USING THE MODEL DERMA

Ubaydullaev M.Sh.

`ubaydullayev@samuit.uz`

Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute,
17A, Buz-2, Tashkent, 100125 Uzbekistan.

The paper studies the process of wet deposition of radioactive impurities, including their interaction with rain, snow, and fog. Mathematics models describing the deposition process are presented based on data from the meso-macroscale DERMA model. An analysis of the influence of meteorological conditions and particle size on their trajectory and deposition distance is carried out. Based on data from the Samarkand meteorological station for 2023, calculations of the deposition of particles of various sizes were performed using the developed methodology. The calculation results demonstrate the importance of taking into account meteorological factors and particle size for predicting air pollution and planning measures to reduce their impact of wet deposition of radioactive impurities in the atmosphere using the DERMA model.

Keywords: air pollution, wet deposition, forecasting, DERMA model, radioactive impurities.

Citation: Ubaydullaev M.Sh. 2024. Modeling the process of wet deposition of radioactive impurities in the atmosphere using the model DERMA. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 6(62):91-104.

ПРОБЛЕМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ

№ 6(62) 2024

Журнал основан в 2015 году.

Издается 6 раз в год.

Учредитель:

Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и
искусственного интеллекта.

Главный редактор:

Равшанов Н.

Заместители главного редактора:

Азамов А.А., Арипов М.М., Шадиметов Х.М.

Ответственный секретарь:

Ахмедов Д.Д.

Редакционный совет:

Азамова Н.А., Алоев Р.Д., Амиргалиев Е.Н. (Казахстан), Бурнашев В.Ф.,
Загребина С.А. (Россия), Задорин А.И. (Россия), Игнатъев Н.А.,
Ильин В.П. (Россия), Исмагилов И.И. (Россия), Кабанихин С.И. (Россия),
Карачик В.В. (Россия), Курбонов Н.М., Маматов Н.С., Мирзаев Н.М.,
Мирзаева Г.Р., Мухамадиев А.Ш., Назирова Э.Ш., Нормуродов Ч.Б.,
Нуралиев Ф.М., Опанасенко В.Н. (Украина), Расулмухамедов М.М., Расулов А.С.,
Садуллаева Ш.А., Старовойтов В.В. (Беларусь), Хаётов А.Р., Халджигитов А.,
Хамдамов Р.Х., Хужаев И.К., Хужаеров Б.Х., Чье Ен Ун (Россия),
Шабозов М.Ш. (Таджикистан), Dimov I. (Болгария), Li Y. (США),
Mascagni M. (США), Min A. (Германия), Schaumburg H. (Германия),
Singh D. (Южная Корея), Singh M. (Южная Корея).

Журнал зарегистрирован в Агентстве информации и массовых коммуникаций при
Администрации Президента Республики Узбекистан.

Регистрационное свидетельство №0856 от 5 августа 2015 года.

ISSN 2181-8460, eISSN 2181-046X

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

За точность фактов и достоверность информации ответственность несут авторы.

Адрес редакции:

100125, г. Ташкент, м-в. Буз-2, 17А.

Тел.: +(998) 712-319-253, 712-319-249.

Э-почта: journals@airi.uz.

Веб-сайт: <https://journals.airi.uz>.

Дизайн и вёрстка:

Шарипов Х.Д.

Отпечатано в типографии НИИ РЦТИИ.

Подписано в печать 27.12.2024 г.

Формат 60x84 1/8. Заказ №8. Тираж 100 экз.

PROBLEMS OF COMPUTATIONAL AND APPLIED MATHEMATICS

No. 6(62) 2024

The journal was established in 2015.
6 issues are published per year.

Founder:

Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute.

Editor-in-Chief:

Ravshanov N.

Deputy Editors:

Azamov A.A., Aripov M.M., Shadimetov Kh.M.

Executive Secretary:

Akhmedov D.D.

Editorial Council:

Azamova N.A., Alov R.D., Amirgaliev E.N. (Kazakhstan), Burnashev V.F.,
Zagrebina S.A. (Russia), Zadorin A.I. (Russia), Ignatiev N.A., Ilyin V.P. (Russia),
Ismagilov I.I. (Russia), Kabanikhin S.I. (Russia), Karachik V.V. (Russia), Kurbonov
N.M., Mamatov N.S., Mirzaev N.M., Mirzaeva G.R., Mukhamadiev A.Sh., Nazirova
E.Sh., Normurodov Ch.B., Nuraliev F.M., Opanasenko V.N. (Ukraine), Rasulov A.S.,
Sadullaeva Sh.A., Starovoitov V.V. (Belarus), Khayotov A.R., Khaldjigitov A.,
Khamdamov R.Kh., Khujaev I.K., Khujayorov B.Kh., Chye En Un (Russia),
Shabozov M.Sh. (Tajikistan), Dimov I. (Bulgaria), Li Y. (USA), Mascagni M. (USA),
Min A. (Germany), Schaumburg H. (Germany), Singh D. (South Korea),
Singh M. (South Korea).

The journal is registered by Agency of Information and Mass Communications under the
Administration of the President of the Republic of Uzbekistan.

The registration certificate No. 0856 of 5 August 2015.

ISSN 2181-8460, eISSN 2181-046X

At a reprint of materials the reference to the journal is obligatory.
Authors are responsible for the accuracy of the facts and reliability of the information.

Address:

100125, Tashkent, Buz-2, 17A.

Tel.: +(998) 712-319-253, 712-319-249.

E-mail: journals@airi.uz.

Web-site: <https://journals.airi.uz>.

Layout design:

Sharipov Kh.D.

DTAIDRI printing office.

Signed for print 27.12.2024

Format 60x84 1/8. Order No. 8. Printed copies 100.

Содержание

Равшанов Н., Насруллаев П.

Математическое моделирование процесса переноса и диффузии загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы с учетом рельефа местности . . . 5

Каримов М.М., Каршиев Д.А.

Моделирование процесса нелинейной фильтрации подземных вод в пористой среде 23

Равшанов Н., Махмудов Р.З.

Регрессионный анализ состава пыли в атмосферном воздухе города 34

Холмуродов А.Э., Матанов М.Ч.

Модель сейсмического возбуждения полупространственного распространения волн Рэлея 45

Равшанов Н., Шадманов И.У., Адизова З.М.

Разработка математической модели для контроля и прогнозирования процессов теплопередачи и потери влаги при хранении пористых тел 57

Палванов Б.Ю., Жафаров С., Исламов Ю.Н.

Моделирование процесса сепарирования сыпучих смесей центробежным сепаратором с учетом изменения коэффициента сопротивления частиц 73

Убайдуллаев М.Ш.

Моделирование процесса влажного осаждения радиоактивных примесей в атмосфере с использованием модели DERMA 91

Мурадов Ф.А.

Усовершенствованная математическая модель процесса распространения газовых смесей и аэрозольных частиц в атмосфере и численный алгоритм решения задачи методом физического расщепления 105

Сулуюкова Л.Ф., Ахмеджанова З.И.

Модели и алгоритмы обработки данных в транспортной логистике сельскохозяйственных регионов с использованием многокритериальных эволюционных алгоритмов 125

Мухамедиева Д.Т., Раупова М.Х.

Решение сложных задач смешанно-бинарной ограниченной оптимизации . . 137

Contents

Ravshanov N., Nasrullaev P.

Mathematical modeling of pollutant transport and diffusion in the near-surface atmospheric layer with consideration of terrain characteristics 5

Karimov M.M., Karshiev D.A.

Modeling of the nonlinear groundwater filtration process in a porous medium . . 23

Ravshanov N., Mahmudov R.Z.

Analysis of dust composition in the atmospheric air of the city 34

Kholmurodov A.E., Matanov M.Ch.

Seismic excitation model of half-space propagation of Rayleigh waves 45

Ravshanov N., Shadmanov I.U., Adizova Z.M.

Development of a mathematical model for monitoring and forecasting heat transfer processes and moisture loss during storage of porous bodies 57

Palvanov B.Y., Jafarov S.K., Islamov Y.N.

Modeling the separation process of bulk mixtures by a centrifugal separator taking into account the change in the particle resistance coefficient 73

Ubaydullaev M.Sh.

Modeling the process of wet deposition of radioactive impurities in the atmosphere using the model DERMA 91

Muradov F.A.

Advanced mathematical model of propagation of gas mixtures and aerosol particles in the atmosphere and numerical solution algorithm based on physical splitting method 105

Sulyukova L.F., Akhmedjanova Z.I.

Models and algorithms for data processing in transport logistics of agricultural regions using multi-criteria evolutionary algorithms 125

Mukhamediyeva D.T., Raupova M.H.

Solving complex mixed-binary constrained optimization problems 137