

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.15593/2224-9400/2024.2.08
УДК 628,533

Научная статья

Д.А. Тукмаков

Федеральный исследовательский центр КазНЦ РАН,
Казань, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОАГУЛЯЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ЖИДКОСТНОЙ ОЧИСТКЕ ЗАПЫЛЕННОЙ СРЕДЫ

Одним из видов очистки промышленных выбросов от дисперсных включений являются технологии жидкостной очистки. Для оптимизации такого рода технологий необходимо исследование физических процессов, протекающих в движущемся потоке газодисперсных сред, распределение концентрации в аэродинамическом потоке с учетом коагуляции дисперсных включений.

В работе представлена математическая модель, реализующая непрерывную методику моделирования динамики многофазных сред, которая предполагает решение полной системы уравнений динамики для каждой из фаз смеси. Несущая среда описывалась как вязкий сжимаемый и теплопроводный газ. Также учитывался межфазный обмен импульсом и межфазный теплообмен. Межфазный обмен импульсом включал в себя силу аэродинамического сопротивления, силу присоединенных масс, силу Архимеда. На тех границах расчетной области, которые моделируются как твердые поверхности, задавались однородные граничные условия Дирихле для составляющих скорости несущей среды и дисперсной фазы. Дисперсная фаза газозвеси описывалась как многофракционная, фракции которой могут отличаться размером дисперсных включений и плотностью материала частиц. Также математическая модель предполагала учет взаимодействия между частицами, через поглощение более крупными частицами более мелких частиц за счет столкнательной коагуляции. Система уравнений математической модели интегрировалась явным конечно-разностным методом.

Для моделирования процесса жидкостной очистки применялась математическая модель, учитывавшая взаимодействие между несущей средой и дисперсной фазой имеющей полидисперсный многофракционный состав. Для учета межфазного обмена импульсом учитывались сила Архимеда, сила присоединенных масс, сила аэродинамического сопротивления.

В результате расчетов выявлено, что концентрация пылевой фракции уменьшается от боковых поверхностей к оси канала. Также определено, что интенсив-

ность увеличения концентрации капельных фракций прямо пропорциональна размеру дисперсных включений капельных фракций.

Ключевые слова: численное моделирование, многофазные среды, коагуляция, полидисперсная газовзвесь, уравнение Навье – Стокса.

D.A. Tukmakov

Federal Research Center "Kazan Scientific Center
of the Russian Academy of Sciences", Kazan, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF COAGULATION OF DISPERSED INCLUSIONS DURING LIQUID CLEANING OF DUSTY ENVIRONMENTS

One of the types of purification of industrial emissions from dispersed inclusions is liquid cleaning technologies. To optimize this type of technology, it is necessary to study the physical processes occurring in a moving flow of gas-dispersed media, the distribution of concentration in the aerodynamic flow, taking into account the coagulation of dispersed inclusions.

The paper presents a mathematical model that implements a continuum technique for modeling the dynamics of multiphase media, which involves solving a complete system of dynamic equations for each of the phases of the mixture. The carrier medium was described as a viscous, compressible and thermally conductive gas. Interfacial momentum exchange and interfacial heat transfer were also taken into account. Interphase momentum exchange included the force of aerodynamic drag, the force of added masses, and the Archimedes force. At those boundaries of the computational domain that are modeled as solid surfaces, homogeneous Dirichlet boundary conditions were specified for the velocity components of the carrier medium and the dispersed phase. The dispersed phase of a gas suspension was described as multifractional, the fractions of which may differ in the size of dispersed inclusions and the density of the particle material. Also, the mathematical model assumed taking into account the interaction between particles, through the absorption of smaller particles by larger particles due to collisional coagulation. The system of equations of the mathematical model was integrated by an explicit finite-difference method.

To simulate the liquid cleaning process, a mathematical model was used that took into account the interaction between the carrier medium and the dispersed phase having a polydisperse multifractional composition. To take into account the interphase exchange of momentum, the Archimedes force (is it written here correctly?), the force of the added masses, and the aerodynamic drag force were taken into account.

As a result of calculations, it was revealed that the concentration of the dust fraction decreases from the side surfaces to the axis of the channel. It was also determined that the intensity of the increase in the concentration of droplet fractions is directly proportional to the size of dispersed inclusions of droplet fractions.

Keywords: numerical modeling, multiphase media, coagulation, polydisperse gas suspension, Navier-Stokes equation.

Введение. Одной из теоретических основ процессов химических технологий являются процессы гидродинамики газов и жидкостей. В работе [1] разработана математическая модель управления накоплением жидкости в отстойнике системы оборотного водоснабжения очистных сооружений. Авторами [2] экспериментально исследованы массообменные процессы в бинарных смесях металлических расплавов. В работе [3] получено точное решение дифференциального уравнения, описывающего концентрации тяжелых компонентов смеси жидких расплавов. Актуальной областью исследований современной механики жидкости и газа является динамика неоднородных сред. Динамика неоднородных сред существенным образом отличается от динамики однородных жидкостей и газов. В монографии [4] представлена общая теория динамики многофазных сред. А.Г. Кутушевым [5] в одномерном приближении, без учета вязкости среды разработаны математические модели и проведены численные расчеты динамики запыленных, газочапельных и порошковых сред. В монографии [6] разработаны магматические модели, численные алгоритмы моделирования и приведены результаты расчетов ударно-волновых и детонационных процессов в газозвесах металлических частиц. В публикации [7] проведено физико-математическое моделирование процесса адсорбции газовых компонентов на адсорбент, инжектируемый в паровоздушный поток в цилиндрической трубе и трубе Вентури. В работе [8] выполнено численное моделирование научно-технической задачи определения эффективности насадочных скрубберов при конденсационном охлаждении и очистке газов от дисперсной фазы газов.

В статье [9] экспериментально исследовалось влияние коагуляции и седиментации на процесс очистки аэрозолей, возникающих при выбросе продуктов работы промышленности в атмосферу. В работе [10] математически моделируется процесс коагуляции твердых дисперсных частиц с каплями орошаемой жидкости в аппаратах мокрого типа на основе труб Вентури под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. В результате моделирования показана возможность повышения эффективности улавливания высокодисперсных частиц в скруббере Вентури за счет введения ультразвуковых колебаний. В работе [11] проведены исследования физических особенностей инерционного движения вращающихся капель жидкости, по результатам которых разработана математическая модель их циркуляционного движения в газовой среде.

Для моделирования динамики газовзвесей на данный момент существует три основных подхода [4]. Равновесный подход предполагает описание течения неоднородной среды как однородного газа с учетом коэффициентов, дающих поправки на неоднородность среды. Диффузионный подход гидродинамики неоднородных сред предполагает интегрирование уравнений сохранения импульса и энергии для всей смеси в целом и отдельное интегрирование уравнений сохранения плотности компонент смеси. Также существует континуальный подход механики неоднородных сред, предполагающий интегрирование для каждой из компонент смеси полной системы уравнений динамики сплошной среды с учетом межфазного обмена импульсом и теплообмена. Континуальный подход динамики неоднородных сред является наиболее адекватным при описании течений многофазных сред, в которых компоненты имеют различное агрегатное состояние, в случае, когда массовые доли фаз смеси являются величинами одного порядка.

В работах, посвященных динамике неоднородных сред, в связи с различными практическими приложениями, исследуются как течения газодисперсных сред, так и физические процессы, протекающие в дисперсной фазе неоднородных сред. Отдельный интерес представляет моделирование течений с коагулирующими дисперсными включениями [12]. Интерес к динамике коагулирующих дисперсных сред связан с оптимизацией работы устройств жидкостной очистки запыленных сред от твердых дисперсных течений [9–11]. В данной работе численно моделируется динамика газовзвесей в вязком сжимаемом теплопроводном газе, что позволяет учесть пристеночную вязкость газа. Дисперсная фаза моделировалась как многофракционная полидисперсная. Фракции дисперсной фазы могут отличаться как плотностью материала, так и размером дисперсных включений [13]. Применяемая для численных расчетов математическая модель реализовывала континуальную методику моделирования течений многофазных сред [14]. Учитывался межфазный теплообмен и межфазный обмен импульсом. Математическая модель учитывала несколько сил межфазного обмена импульсом, что позволяет более точно описать динамику дисперсных включений в потоке газа. Целью работы было исследование пространственных распределений фракции газовзвеси в процессе бокового вдува капельных фракций.

Методика исследования. Численные расчеты, описанные в данной работе, были проведены вычислительным комплексом [14]. Движение несущей среды описывается системой уравнений Навье – Стокса с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена [7, 13–19]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv - \tau_{xy}) = -\sum_{i=1,n} F_{xi} + \sum_{i=1,n} \alpha_i \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p - \tau_{yy}) = -\sum_{i=1,n} F_{yi} + \sum_{i=1,n} \alpha_i \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left([e + p - \tau_{xx}] u - \tau_{xy} v - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left([e + p - \tau_{yy}] v - \tau_{xy} u - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \\ & = \sum_{i=1,n} Q_i - \sum_{i=1,n} (|F_{xi}|(u - u_i) - |F_{yi}|(v - v_i)) + \\ & + \sum_{i=1,n} \alpha_i \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right), \quad \tau_{yy} = \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} D \right), \\ \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}. \end{aligned}$$

Динамика каждой из фракции дисперсной фазы описывается уравнением сохранения средней плотности фракции, уравнениями сохранения составляющих импульса и уравнением сохранения энергии [7, 13–19]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i u_i v_i) = F_{xi} - \alpha_i \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i v_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i v_i^2) = F_{yi} - \alpha_i \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial(e_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(e_i u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(e_i v_i) = -Q_i, \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 \rho_i &= \alpha_i \rho_{i0}, \quad e_i = \rho_i C_{vi} T_i, \\
 F_{xi} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha}{(2r)} C_d \rho \sqrt{(u-u_i)^2 + (v-v_i)^2} (u-u_i) + \\
 &\quad + \alpha_i \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\
 &+ 0.5 \alpha_i \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} \right), \\
 F_{yi} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(d_i)} C_d \rho \sqrt{(u-u_i)^2 + (v-v_i)^2} (v-v_i) + \\
 &\quad + \alpha_i \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\
 &+ 0.5 \alpha_i \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial v_i}{\partial y} \right), \\
 C_{di} &= \frac{24}{\text{Re}_i} + \frac{4}{\text{Re}_i^{0.5}} + 0.4, \quad M_i = |\bar{V} - \bar{V}_i| / c, \\
 \text{Re}_i &= \rho |\bar{V} - \bar{V}_i| d_i / \mu, \quad \text{Pr} = C_p \mu / \lambda, \\
 Q_i &= 6 \alpha_i \lambda \text{Nu}_i (T - T_i) / d_i^2, \quad i = 2, \dots, n.
 \end{aligned}$$

Для описания процесса коагуляции частиц использовалась модель коагуляции [12, 13]. Масса m_i частицы i -й фракции ($i = 2, \dots, n$) возрастает за счет поглощения более мелких частиц j -х фракций с массой m_j [13] ($j = 1, 2, \dots, i - 1$):

$$\begin{aligned}
 \frac{dm_i}{dt} &= \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} n_j m_j, \\
 k_{ij} &= \frac{\pi}{4} (d_i + d_j)^2 \left[u_i \cos(\theta) + v_i \sin(\theta) - \sqrt{u_j^2 + v_j^2} \right], \quad \theta = \arctg(v_j/u_j).
 \end{aligned}$$

Здесь k_{ij} – константа коагуляции. Полученные значения массы частиц i -й фракции в данном узле конечно-разностной сетки определяет новое значение радиуса частицы r_i . Уменьшение концентрации мелких частиц i -х фракций вследствие поглощения их частицами j -х ($j = i + 1, i + 2, \dots, n$) фракций, чьи дисперсные включения имеют больший размер описывается уравнением

$$\frac{dn_i}{dt} = -n_i \sum_{j=i+1}^n k_{ij} n_j.$$

Новое значение объемного содержания i -й фракции, изменившегося вследствие коагуляции, определяется как $\alpha_i = n_i (\pi(d_i)^3)/6$. Объемное содержание и физическая плотность вещества определяют среднюю плотность фракции, изменившуюся вследствие коагуляции: $\rho_i = \alpha_i \rho_{i0}$. Слияние мелких капель с более крупными приводит к изменению скорости капель укрупнившейся фракции [12, 13]:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} (u_j - u_i) m_j n_j, \quad \frac{dv_i}{dt} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} (v_j - v_i) m_j n_j.$$

Температура частицы i -й фракции после коагуляции с частицами фракций, чьи частицы имеют меньший размер находилась из соотношения

$$T_{i*} = \frac{1}{C_{i*} m_{i*}} \left(\sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} n_j C_j m_j T_j + C_i m_i T_i \right),$$

где T_{i*} , C_{i*} , m_{i*} – температура, удельная массовая теплоемкость и масса частицы i -й фракции после коагуляции; T_i , C_i , m_i – те же параметры до коагуляции. Зная новую температуру и среднюю плотность, находим тепловую энергию фракции, измененную при коагуляции. Связанные с коагуляцией изменения средней плотности, скорости и температуры фракций дисперсной фазы учитывались на каждом временном шаге основного алгоритма.

На твердых поверхностях для составляющих скорости задавались однородные граничные условия Дирихле, для остальных динамических функций задавались однородные граничные условия Неймана. На входе в канал задавались продольная скорость пылевой фракции и газа и концентрация пылевой фракции. На выходе из канала задавались однородные условия Неймана для всех функций. На боковой поверхности вдува задавалась поперечная скорость газа и капельных фракций, концентрация капельных фракций:

$$\begin{aligned} u(t, 1, j) = u_0, u_1(t, 1, j) = u_0, u_k(t, 1, j) = u_k(t, 2, j), \\ v(t, 1, j) = 0, v_1(t, 1, j) = 0, v_k(t, 1, j) = v_k(t, 2, j), \\ u_k(t, N_x, j) = u_k(t, N_x - 1, j), v_k(t, N_x, j) = v_k(t, N_x - 1, j), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u(t, i, N_y) &= 0, u_k(t, i, N_y) = 0, v(t, i, N_y) = 0, v_k(t, i, N_y) = 0, \\
 u(t, i, 1) &= 0, u_k(t, i, 1) = 0, u(t, i, 1) = 0, u_k(t, i, 1) = 0, \\
 \rho(t, 1, j) &= \rho(t, 2, j), \rho_1(t, 1, j) = \rho_{10} \alpha_{10}, \rho_k(t, 1, j) = \rho_k(t, 2, j), \\
 \rho(t, N_x, j) &= \rho(t, N_x - 1, j), \rho_k(t, N_x, j) = \rho_k(t, N_x - 1, j), \\
 \rho(t, i, 1) &= \rho(t, i, 2), \rho_k(t, i, 1) = \rho_k(t, i, 2), \\
 \rho(t, i, N_y) &= \rho(t, i, N_y - 1), \rho_k(t, i, N_y) = \rho_k(t, i, N_y - 1), \\
 e(t, 1, j) &= e(t, 2, j), e_k(t, 1, j) = e_k(t, 2, j), \\
 e(t, N_x, j) &= e(t, N_x - 1, j), e_k(t, N_x, j) = e_k(t, N_x - 1, j), \\
 e(t, i, 1) &= e(t, i, 2), e_k(t, i, 1) = e_k(t, i, 2), \\
 e(t, i, N_y) &= e(t, i, N_y - 1), e_k(t, i, N_y) = e_k(t, i, N_y - 1), \\
 p(t, 1, j) &= p(t, 2, j), p(t, N_x, j) = p(t, N_x - 1, j), \\
 p(t, i, 1) &= p(t, i, 2), p(t, i, N_y) = p(t, i, N_y - 1).
 \end{aligned}$$

В области вдува задаются следующие граничные условия:

$$L_1 \leq i \Delta x \leq L_2,$$

$$\rho_k(t, i, 1) = \alpha_{k0} \rho_{k0}, v(t, i, 1) = v_0, v_k(t, i, 1) = v_0, v_1(t, i, 1) = v_1(t, i, 2).$$

Здесь $N_x = 200$, $N_y = 100$ – количество узлов; i, j – нумерация узлов в x и y направлениях соответственно.

Система уравнений динамики многофазной среды (1)–(8) решалась двухэтапным явным конечно-разностным методом Мак-Кормака, позволяющим получать решения второго порядка точности [20].

Алгоритм численного метода можно отобразить на примере нелинейного уравнения

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial a(f)}{\partial x} + \frac{\partial b(f)}{\partial y} = c(f). \quad (9)$$

При реализации алгоритма последовательно выполняются действия [20]:

$$f_{j,k}^* = f_{j,k}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{j+1,k}^n - a_{j,k}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{j,k+1}^n - b_{j,k}^n) + \Delta t c_{j,k}^n, \quad (10)$$

$$f_{j,k}^{n+1} = 0,5(f_{j,k}^n + f_{j,k}^*) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{j,k}^* - a_{j-1,k}^*) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{j,k}^* - b_{j,k-1}^*) + 0,5 \Delta t c_{j,k}^* \quad (11)$$

Здесь Δx , Δy , Δt – шаги конечно-разностной сетки. Для подавления численных осцилляций, возникающих в процессе интегрирования уравнений методом Мак-Кормака, применялась схема нелинейной коррекции [14, 21]. Для увеличения устойчивости численного решения применяется схема сглаживания конечно-разностного решения [22].

Результаты расчетов. Задавались следующие параметры несущей фазы газовой смеси: молярная масса воздуха $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, теплопроводность несущей среды $\lambda = 0,02553$ Вт/(м·К), динамическая вязкость несущей среды $\mu = 1,72 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\gamma = 1,4$, $R = 8,31$ Дж/(моль · К). Начальная плотность несущей среды $\rho_0 = 1,29$ кг/м³. На рис. 1 представлена общая схема моделируемого течения неоднородной среды в канале с боковым вдувом капельных фракций.

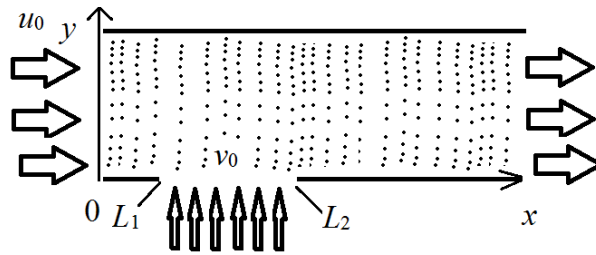


Рис. 1. Схематичное изображение канала

Предполагалось, что в начальный момент времени во всей расчетной области пылевая фракция и газ движутся в продольном направлении со скоростью $u_0 = 20$ м/с.

В канал с запыленной средой происходит истечение потока четырех капельных фракций, отличающихся размером частиц. Поток капельных фракций и газа движется со скоростью $v_0 = 4$ м/с под углом $\beta = \pi/2$ к поверхности канала. Длина канала $L = 0,4$ м, ширина канала $h = 0,1$ м, $L_1 = 0,1$ м, $L_2 = 0,2$ м. Физические плотности пылевой фракции и капельных фракций $\rho_{10} = 2500$ кг/м³ и $\rho_{i0} = 1000$ кг/м³ соответственно. Дисперсные включения запыленной среды имеют размер $d_1 = 2$ мкм, размеры капельных фракций: $d_2 = 4$ мкм, $d_3 = 8$ мкм, $d_4 = 20$ мкм, $d_5 = 40$ мкм.

В данной работе течение газодисперсной среды описывается следующими параметрами: максимальное значение относительного числа Рейнольдса $Re_5 = d_5 \rho |V - V_5| / \mu \approx 30$, число Стокса для фракции самых крупных частиц $Stk_5 = \rho |V| d_5 / \mu L \approx 0,025$, число Кнудсена $Kn = (M/Re) \sqrt{\gamma \pi / 2} \approx 0,000002$.

В расчетах на твердых поверхностях для всех составляющих скоростей газовой фазы задавались однородные граничные условия Дирихле (рис. 2).

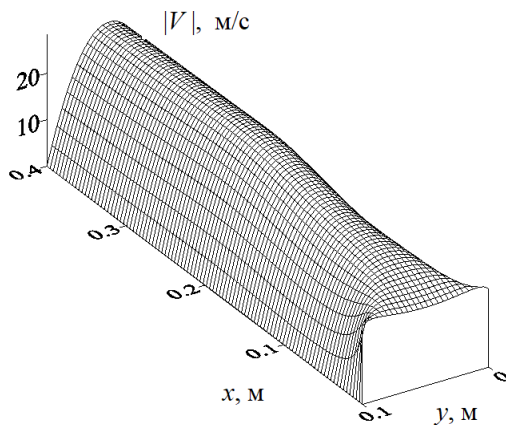


Рис. 2. Пространственное распределение модуля скорости газа

Начальное объемное содержание и объемное содержание на входе в канал пылевой фракции ($x = 0$) $\alpha_{10} = 0,00004$, начальная средняя плотность и средняя плотность на входе в канал $\rho_1 = 0,1 \text{ кг/м}^3$ (рис. 3).

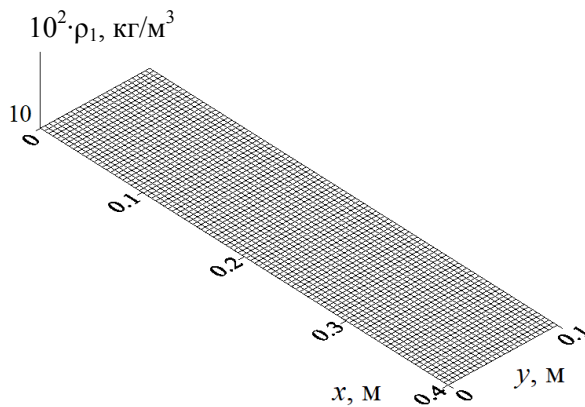


Рис. 3. Начальное пространственное распределение средней плотности пылевой фракции

Предполагалось, что у всех четырех капельных фракций на поверхности вдува постоянное объемное содержание $\alpha_{i0} = \alpha_{i0} = 25 \cdot 10^{-6}$ и средняя плотность $\rho_i = 0,025 \text{ кг/м}^3$, $i = 2, \dots, 5$ (рис. 4).

В последующий момент времени происходит уменьшение средней плотности пылевой фракции за счет поглощения дисперсных включений пылевой фракции дисперсными включениями капельных фракций (рис. 5).

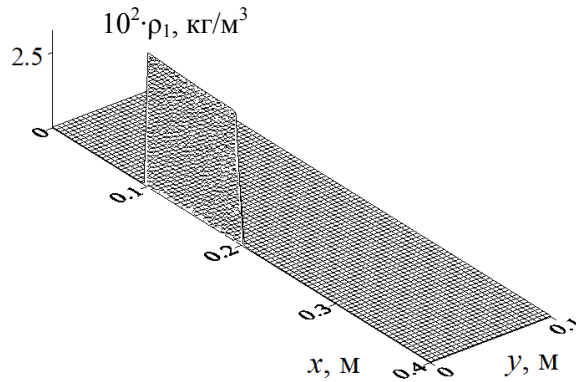


Рис. 4. Начальное пространственное распределение средней плотности одной из капельных фракций

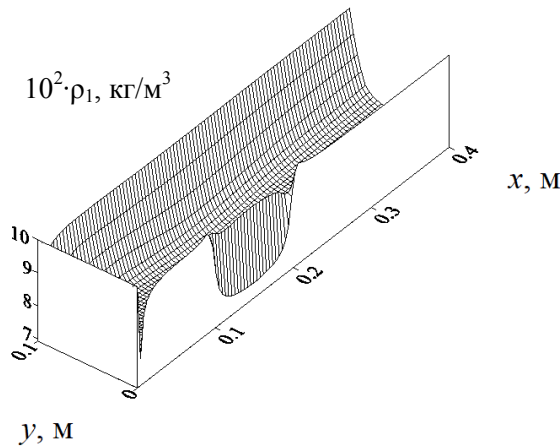


Рис. 5. Пространственное распределение средней плотности пылевой фракции в момент времени $t = 0,031 \text{ с}$

На рис. 6 представлено распределение средней плотности пылевой фракции вдоль оси x ($y = h/2$), в процессе движения по каналу происходит уменьшение средней плотности пылевой фракции приблизительно на 30 %.

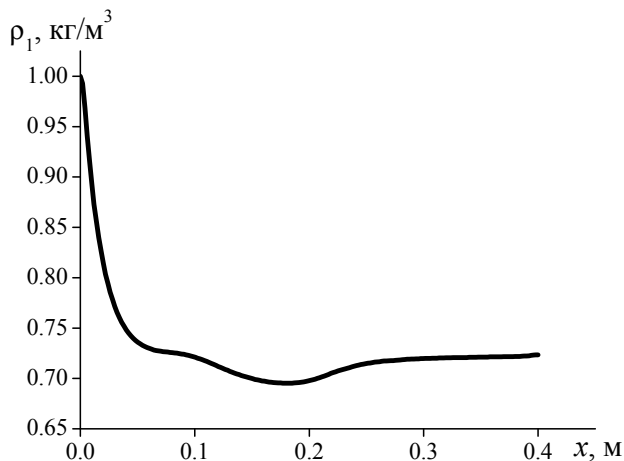


Рис. 6. Пространственное распределение средней плотности пылевой фракции вдоль оси x в сечении $y = h/2$, момент времени $t = 0,031$ с

Распределение средней плотности пылевой фракции газозвеси вдоль оси y ($x = L/2$) демонстрирует, что наименьшее содержание в газе пылевой фракции наблюдается вблизи оси симметрии канала (рис. 7).

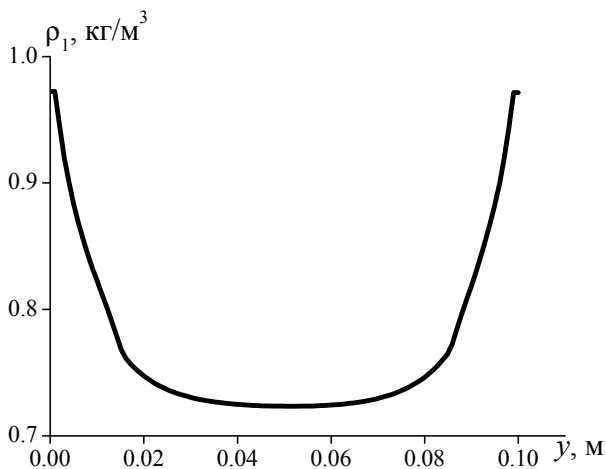


Рис. 7. Пространственное распределение средней плотности пылевой фракции вдоль поперечной оси y в сечении $x = L/2$, момент времени $t = 0,031$ с

Одним из важных параметров взаимодействия между компонентами газозвеси [5] является скоростное скольжение. Рассмотрим скоростное скольжение донорской фракции дисперсной фазы и поглощающих капельных фракций $-|V_1 - V_i| = \sqrt{(u_1 - u_i)^2 + (v_1 - v_i)^2}$. На рис. 8

представлены значения модуля разности скоростей пылевой фракции и капельных фракций вдоль поперечной оси y в сечении ($x = L/2$), для более крупных частиц модуль разности скоростей поглощаемых капельных фракций имеет большее значение.

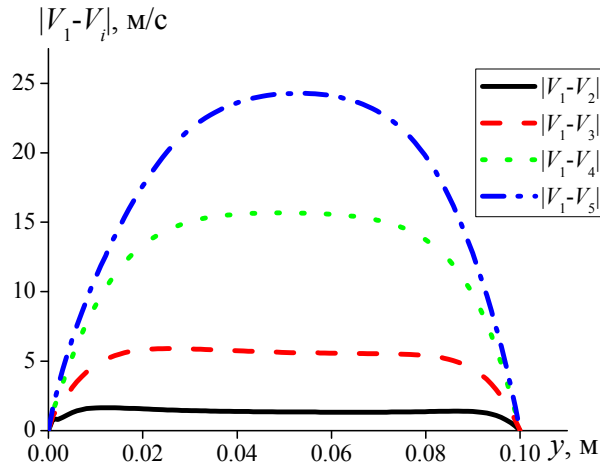


Рис. 8. Пространственное распределение модуля разности скоростей пылевой фракции и капельных фракций вдоль оси y в сечении $x = L/2$, момент времени – $t = 0,061$ с

Распределение средних плотностей капельных фракций поперек канала ($x = L/2$) представлено на рис. 9.

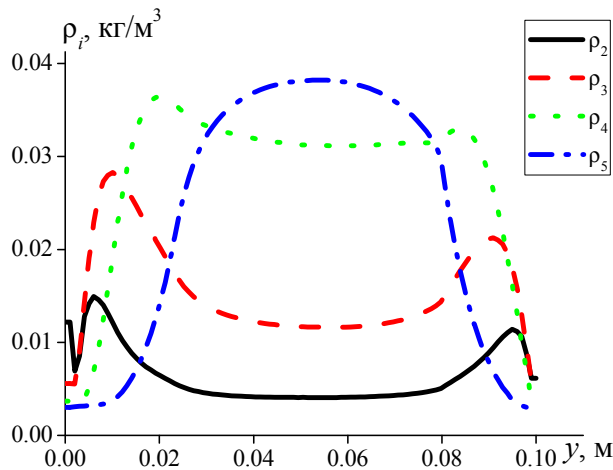


Рис. 9. Пространственное распределение средней плотности капельных фракций вдоль оси y в сечении $x = L/2$, в момент времени $t = 0,061$ с

Для капельных фракций с большими размерами дисперсных включений наблюдаются большие значения средних плотностей. В связи с тем, что в столкновительной математической модели коагуляции интенсивность коагуляции зависит от величины межфракционного скоростного скольжения [12, 13].

Выводы. В работе численно моделировалось течение полидисперсной многофракционной газозвеси с учетом коагуляции дисперсных включений. Исследован процесс поглощения фракции дисперсной фазы с физической плотностью материала частиц эквивалентной плотности кварцевого песка и диаметром дисперсных включений $d_1 = 2$ мкм четырьмя фракциями с плотностью воды и размерами дисперсных включений $d_2 = 4$ мкм, $d_3 = 8$ мкм, $d_4 = 20$ мкм, $d_5 = 40$ мкм. Средняя плотность пылевой фракции газозвеси достигает наименьшего значения на оси канала и увеличивается к боковым стенкам канала. Определено, что величина поперечных распределений средних плотностей капельных фракций пропорциональна их линейному размеру, что связано с тем, что для более крупных капель значение скоростного скольжения с поглощаемой пылевой фракцией имеет большее значение. Выявленные закономерности возможно использовать при оптимизации технологий жидкостной очистки газодисперсных сред от твердых дисперсных примесей.

Список литературы

1. Колыхматов, А.О. Моделирование процесса накопления жидкости в отстойнике очистных сооружений системы оборотного водоснабжения при синтезе системы автоматического управления / А.О. Колыхматов, В.П. Плаксына, А.Г. Шумихин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2014. – № 1. – С. 28–38.
2. Углев, Н.П. Эффекты поверхностного течения при диффузионном массообмене в расплавах олово-свинец / Н.П. Углев, С.Н. Углев, Е.Ф. Тимебулатова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2023. – № 4. – С. 77–91.
3. Углев, Н.П. Точное решение барометрического уравнения Ландау для смеси двух компонентов методом самосогласования / Н.П. Углев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2015. – № 4. – С. 137–144.

4. Нигматулин, Р.И. Основы механики гетерогенных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
5. Кутушев, А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах / А.Г. Кутушев. – СПб.: Недра, 2003. – 284 с.
6. Федоров, А.В. Волновые процессы в газовзвесах частиц металлов / А.В. Федоров, В.М. Фомин, Т.А. Хмель. – Новосибирск: Параллель, 2015. – 301 с.
7. Шиляев, М.И. Динамика процесса тепломассообмена при инжектировании диспергированного адсорбента в парогазовый поток / М.И. Шиляев, Е.М. Хромова // Теоретические основы химической технологии. – 2021. – Т. 55, № 4. – С. 506–516.
8. Лаптева, Е.А. Математическая модель контактного охлаждения и очистки от дисперсной фазы газов в насадочных скрубберах / Е.А. Лаптева, А.Г. Лаптев, С.У. Аласгарли // Теоретические основы химической технологии. – 2022. – Т. 56, № 2. – С. 244–251.
9. A Highly Efficient Biomass Compound Aerosol Suppressant in Purifying Radioactive Cesium Droplet Aerosols / L. Wu, S. Lei, Y. Wang, S. Yang, X. Lin, H. Wang // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, no. 19. – P. 1–18.
10. Моделирование процесса мокрой очистки газов с наложением ультразвуковых полей / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских, В.А. Нестеров, Р.Н. Голых // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 57–63.
11. Повышение эффективности пылеулавливания / В.Н. Макаров, А.В. Угольников, Н.В. Макаров, Г.А. Боярских // Горный журнал. – 2022. – № 8. – С. 62–70.
12. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справ.: в 5 т. – Т. 1 Методы расчета / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин, В.А. Худяков. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1971. – 267 с.
13. Тукмаков, А.Л. Динамика коагулирующей полидисперсной газовой взвеси в нелинейном волновом поле акустического резонатора / А.Л. Тукмаков // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 1. – С. 11–19.
14. Программа для ЭВМ «Программный код для моделирования динамики однородных и дисперсных сред явным методом Мак-Кормака в обобщенных криволинейных координатах (2D)»: свид-во о рег. программы для ЭВМ / А.Л. Тукмаков. – № 2018616542; заявл. 02.08.2018; опубл. 19.06.2018.
15. Тукмаков, А.Л. Динамика заряженной газовой взвеси с начальным пространственно неравномерным распределением средней плотности дисперсной фазы при переходе к равновесному состоянию / А.Л. Тукмаков, Д.А. Тукмаков // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 4. – С. 509–512.
16. Тукмаков, А.Л. Генерация акустического возмущения движущейся заряженной газовой взвесью / А.Л. Тукмаков, Д.А. Тукмаков // Инженерно-физический журнал. – 2018. – № 5. – С. 1207–1213.

17. Тукмаков, Д.А. Численное исследование влияния параметров дисперсной фазы на генерацию течения газа, формирующегося при гравитационном осаждении аэрозоля / Д.А. Тукмаков // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 279–287.

18. Тукмаков, Д.А. Численное исследование влияния свойств газовой составляющей взвеси твердых частиц на разлет сжатого объема газовзвеси в двухкомпонентной среде / Д.А. Тукмаков // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 2. – С. 304–310.

19. Тукмаков, Д.А. Численное моделирование взаимодействия газовзвеси с ударной волной континуальными математическими моделями с идеальной и диссипативными несущими средами / Д.А. Тукмаков // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2022. – Т. 11, № 4. – С. 67–87.

20. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – Т. 2. – 551 с.

21. Музафаров, И.Ф. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа / И.Ф. Музафаров, С.В. Утюжников // Математическое моделирование. – 1993. – Т. 5, № 3. – С. 74–83.

22. Пирумов, У.Г. Газовая динамика сопел / У.Г. Пирумов, Г.С. Росляков. – М.: Наука, 1990. – 368 с.

References

1. Kolykhmatov A.O., Plaksina V.P., Shumikhin A.G. Modelirovanie processa nakopleniya zhidkosti v otstojnike ochestnyh sooruzhenij sistemy oborotnogo vodosnabzheniya pri sinteze sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Modeling the process of liquid accumulation in the settling tank of treatment facilities of a water recycling system during the synthesis of an automatic control system] *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2014. no. 1. pp. 28-38.

2. Uglev N.P., Uglev S.N., Timerbulatova E.F. Effekty poverhnostnogo techeniya pri diffuzionnom massoobmene v rasplavah olovo-svinec [Effects of surface flow during diffusion mass transfer in tin-lead melts] *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2023. no. 4. pp. 77-91.

3. Uglev N.P. Tochnoe reshenie barometricheskogo uravneniya Landau dlya smesi dvuh komponentov metodom samosoglasovaniya [Exact solution of the Landau barometric equation for a mixture of two components using the self-consistency method] *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2015. no. 4. pp. 137-144.

4. Nigmatulin R. I. Osnovy mekhaniki geterogennyh sred [Fundamentals of mechanics of heterogeneous media]. Moscow: Nauka, 1978. 336 p.

5. Kutushev A.G. Matematicheskoe modelirovanie volnovyh processov v aerodispersnyh i poroshkoobraznyh sredah [Mathematical modeling of wave processes in aerodisperse and powdery media]. St. Petersburg: Nedra, 2003. 284 p.
6. Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel T.A. Volnovye processy v gazovzvesyakh chastic metallov [Wave processes in gas suspensions of metal particles]. Novosibirsk: Parallel, 2015. 301 p.
7. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Dynamics of heat and mass transfer during the injection of dispersed adsorbent into steam-gas flow. T *Theoretical foundations of chemical engineering*. 2021. V. 55. no. 4. pp. 688-698.
8. Lapteva E.A., Laptev A.G., Alasgarli S.W. Mathematical model of contact cooling and purification of the dispersed phase of gases in packed scrubbers. *Theoretical foundations of chemical engineering*. 2022. V. 56. no. 2. pp. 244-251.
9. Wu L., Lei S., Wang Y., Yang S., Lin X., Wang H. A Highly Efficient Biomass Compound Aerosol Suppressant in Purifying Radioactive Cesium Droplet Aerosols. *Molecules*. 2022. V. 27. no. 19. pp. 1-18.
10. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Golykh R.N. Modelirovaniye protsessa mokroy ochistki gazov s nalozheniyem ul'trazvukovykh poley [Modeling the process of wet gas purification with the imposition of ultrasonic fields]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*. 2017. V.20. no. 4. pp. 57-63.
11. Makarov V.N., Ugolnikov A.V., Makarov N.V., Boyarskikh G.A. Modelirovanie processa mokroy ochistki gazov s nalozheniem ul'trazvukovykh poley [Increasing the efficiency of dust collection] *Gornyy zhurnal*. 2022. no. 8. pp. 62-70.
12. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P., Khudyakov V.A. Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya: spravochnik v 5-ti tomah. T. 1 Metody rascheta. [Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products: a reference book in 5 volumes. V. 1 Methods of calculation]. Moscow: Publishing house VINITI, 1971. - 267 p.
13. Tukmakov A.L. Dynamics of a coagulating polydisperse gas suspension in a nonlinear wave field of an acoustic resonator. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. V. 88. no. 1. pp. 11-19.
14. Tukmakov A.L. Programma dlya EVM "Programmnyy kod dlya modelirovaniya dinamiki odnorodnyh i dispersnyh sred yavnym metodom Mak-Kormaka v obobshchennyh krivolinejnyh koordinatah (2D)" [Computer program "Program code for modeling the dynamics of homogeneous and dispersed media using the explicit McCormack method in generalized curvilinear coordinates (2D)"] Certificate of registration of the computer program No. 2018616542 application. 08/02/2018 publ. 06/19/2018.
15. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. Dynamics of a charged gas suspension with an initial spatially nonuniform distribution of the average dispersed phase density during the transition to the equilibrium state. *High Temperature*. 2017. V. 55. no. 4. pp. 491-495

16. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. Generation of Acoustic Disturbances by a Moving Charged Gas Suspension. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018. V. 91. no. 5. pp. 1141–1147

17. Tukmakov D.A. Chislennoe issledovanie vliyaniya parametrov dispersnoj fazy na generaciyu techeniya gaza, formiruyushchegosya pri gravitacionnom osazhdenii aerolya [Numerical study of the influence of dispersed phase parameters on the generation of gas flow formed during gravitational deposition of an aerosol] // *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred*. 2020. V. 13. no. 3. pp. 279-287.

18. Tukmakov D.A. Numerical Investigation of the Influence of Properties of the Gas Component of a Suspension of Solid Particles on the Spreading of a Compressed Gas-Suspension Volume in a Binary Medium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. V. 93. no. 2. pp. 291-297.

19. Tukmakov D.A. Chislennoe modelirovanie vzaimodejstviya gazovzvesi s udarnoj volnoj kontinual'nymi matematicheskimi modelyami s ideal'noj i dissipativnymi nesushchimi sredami [Numerical modeling of the interaction of a gas suspension with a shock wave using continuum mathematical models with ideal and dissipative carrier media] *Vestnik YUUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika*. 2022. T. 11. no. 4. pp. 67–87.

20. Fletcher C.A. *Computation techniques for fluid dynamics*. –Berlin: Springer-Verlang, 1988. 898 p.

21. Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. Primenenie kompaktnyh raznostnyh skhem k issledovaniyu nestacionarnykh techenij szhimaemogo gaza [Application of compact difference schemes to the study of unsteady flows of compressible gas] *Matematicheskoe modelirovanie*. 1993. V.5. no. 3. pp.74-83.

22. Pirumov U.G., Roslyakov G.S. *Gazovaya dinamika sopol* [Gas dynamics of nozzles]. –Moscow: Nauka, 1990. 368 p.

Об авторе

Тукмаков Дмитрий Алексеевич (Казань, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального исследовательского центра Казанского центра Российской академии наук (420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2; e-mail: tukmakovda@imm.knc.ru).

About the author

Dmitry A. Tukmakov (Kazan, Russian Federation) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Researcher at the Federal Research Center of the Kazan Center of the Russian Academy of Sciences (2, Lobachevsky str., Kazan, 420111; e-mail: tukmakovda@imm.knc.ru).

Поступила: 29.02.2024

Одобрена: 02.06.2024

Принята к публикации: 13.06.2024

Финансирование. Работа выполнялась в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Казанского научного центра Российской академии наук.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Тукмаков, Д.А. Численное моделирование коагуляции дисперсных включений при жидкостной очистке, запыленной сред / Д.А. Тукмаков // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2024. – № 2. – С. 103–121.

Please cite this article in English as:

Tukmakov D.A. Numerical simulation of coagulation of dispersed inclusions during liquid cleaning of dusty. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2024, no. 2, pp. 103-121 (*In Russ*).