ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОАГУЛЯЦИИ КАПЕЛЬ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКЦИЙ ПОЛИДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ



Тукмаков Д.А.

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Казань, Россия tukmakovDA@imm.knc.ru

Исследование посвящено изучению влияния интенсивности колебаний аэрозоля на распределение фракций дисперсной компоненты коагулирующего аэрозоля. В работе численно моделируются колебания аэрозоля в закрытом канале. Для описания динамики несущей среды применяется двухмерная нестационарная система уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа, записанная с учетом межфазного силового взаимодействия и межфазного теплообмена. Для описания динамики дисперсной фазы, для каждой ее фракции решается система уравнений, включающая в себя уравнение неразрывности для средней плотности фракции, уравнения сохранения пространственных составляющих импульса и уравнение сохранения тепловой энергии фракции дисперсной фазы газовзвеси. Межфазное силовое взаимодействие включало в себя силу Архимеда, силу присоединенных масс и силу аэродинамического сопротивления. Также учитывался теплообмен между несущей средой – газом и каждой из фракций дисперсной фазы. Математическая модель динамики полидисперсного аэрозоля дополнялась математической моделью столкновительной коагуляции аэрозоля. Для составляющих скорости компонент смеси задавались однородные граничные условия Дирихле. Для остальных функций динамики многофазной смеси задавались однородные граничные условия Неймана. Уравнения решались явным методом Мак-Кормака со схемой нелинейной коррекции, позволяющей получить монотонное решение. В результате численных расчетов было определено, что вблизи генерирующего колебания поршня образуется область с повышенным содержанием крупнодисперсных частиц. Процесс коагуляции приводит к монотонному росту объемного содержания фракции крупнодисперсных частиц и монотонному уменьшению объемного содержания мелкодисперсных частиц. Увеличение интенсивности колебаний газа приводит к интенсификации процесса коагуляции капель аэрозоля.

Ключевые слова: многофазные среды, численное моделирование, полидисперсный аэрозоль, межфазное взаимодействие, коагуляция.

Для цитирования: Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния интенсивности коагуляции капель на распределение фракций полидисперсного аэрозоля // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 1 (47). С. 73–80. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-73-80.

Введение

Многие природные явления и технические процессы связаны с движением сплошных сред, являющихся неоднородными по своим механическим и физико-химическим свойствам [1–10]. Проблема удаления дисперсной компоненты аэрозольных сред в каналах, трубах и емкостях встречается в ряде вопросов промышленной энергетики [6]. Для очистки газокапельного потока от дисперсной фазы часто применяются в инерционные сепараторы. При этом мелкодисперсные частицы плохо отделяются инерционными сепараторами, и возникает задача удаления мелкодисперсных частиц дисперсной фазы за счет поглощения мелкодисперсных капель каплями большего размера, после чего крупнодисперсная фаза газокапельной среды отделяется от газа инерционным сепаратором.

Изучение динамики аэрозольных сред в случае, когда капельная компонента смеси имеет массовую долю, сопоставимую с массовой долей газа, требует использования математических моделей, учитывающих инерционное и тепловое взаимодействие газовой и капельной фаз смеси, скоростную и тепловую неоднородность течения многофазной среды [1]. В данной работе применяется математическая модель, описывающая поля скорости и температуры у каждой из компонент смеси. Дисперсная фаза смеси моделируется как многофракционная – фракции дисперсной фазы отличаются размером дисперсных включений. Математическая модель динамики полидисперсной газокапельной среды дополнялась моделью столкновительной коагуляции [4, 10].

Данная работа посвящена исследованию влияния коагуляции частиц дисперсной фазы аэрозоля на распределение объемного содержания фракций газовзвеси при колебаниях аэрозоля в закрытой трубе.

Методы исследования

Динамика полидисперсной газовзвеси описывается системой уравнений полидисперсной газовзвеси с учетом межфазного обмена импульсом и энергией. Движение несущей среды описывается системой уравнений Навье-Стокса [11] для сжимаемого теплопроводного газа с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \left(\rho_i \mathbf{V}_i \right) = 0, (i = 1, ..., n);$$
(1)

$$\frac{\partial \rho_1 V_1^k}{\partial t} + \nabla^i \left(\rho_1 V_1^k V_1^i + \delta_{ik} p - \tau_{ik} \right) =
= -\sum_{j=2}^m F_{jk} + \sum_{j=2}^m \alpha_j \nabla^k p, \quad (i,k=1,2);$$
(2)

$$\frac{\partial \rho_j V_j^k}{\partial t} + \nabla^i \left(\rho_j V_j^i V_j^k \right) =$$

$$= F_{ik} - \alpha_j \nabla^k p, \ (j = 2, ...n, i, k = 1, 2);$$
(3)

$$\frac{\partial(e_{1})}{\partial t} + \nabla^{i} \left(V_{1}^{i} \left(e_{1} + p - \tau_{ii} \right) - V_{1}^{k} \tau_{ki} - \lambda \nabla^{i} T \right) =$$

$$= -\sum_{j=2}^{n} Q_{j} - \sum_{j=2}^{n} \left| F_{jk} \right| \left(V_{1}^{k} - V_{j}^{k} \right) + \left(\sum_{j=2}^{n} \alpha_{j} \right) \nabla^{k} \left(p V_{1}^{k} \right);$$

$$\frac{\partial(e_{j})}{\partial t} + \nabla^{k} \left(e_{j} V_{j}^{k} \right) = Q_{j}, (j = 2, ..., k = 1, 2), \quad (5)$$

$$p = (\gamma - 1)(e_1 - \rho_1(u_1^2 + v_1^2) / 2),$$

$$e_1 = \rho_1 I + \rho_1(u_1^2 + v_1^2) / 2,$$

$$\rho_i = \alpha_i \rho_{i0}, \quad e_i = \rho_i C_{pi} T_i.$$

Здесь $V_i = [u_i, v_i]$ – вектор скорости компонент смеси, τ_{ij} – тензор вязких напряжений несущей компоненты:

$$\tau_{11} = \mu \left(2\frac{\partial u_1}{\partial x} - \frac{2}{3}D\right), \quad \tau_{22} = \mu \left(2\frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{2}{3}D\right),$$
$$\tau_{12} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial v_1}{\partial x}\right), \quad D = \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y}.$$

Уравнение (1) описывает непрерывность плотности несущей среды и средней плотности фракций дисперсной фазы (*i* > 1). Уравнения (2) и (3) описывают законы сохранения компонент вектора импульса несущей среды и фракций дисперсной фазы соответственно. Уравнения (4) и (5) описывают законы сохранения полной энергии газа и тепловой энергии фракций дисперсной фазы.

Сила межфазного взаимодействия включает в себя силу аэродинамического сопротивления, силу Архимеда и силу присоединенных масс [1]. Здесь *p*, ρ_1 , u_1 , v_1 – давление, плотность, декартовы составляющие скорости несущей среды в направлении осей х и у соответственно; *T*₁, *e*₁ – температура и полная энергия газа; α_i , ρ_i , T_i , C_{pi} , e_i , u_i , v_i – объемное содержание фракции дисперсной фазы, средняя плотность, физическая плотность, температура, теплоемкость, внутренняя энергия, декартовы составляющие скорости фракций дисперсной фазы; F_{ik} – составляющие вектора силового взаимодействия фракций дисперсной фазы и несущей среды, $k = 1,2; Q_i$ – тепловой поток между *j*-ой фракцией дисперсной фазы и несущей средой, *j* = 2...*n*, [1, 2]:

$$F_{xi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_{di} \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_i)^2 + (v_1 - v_i)^2} (u_1 - u_i) + \\ + \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right).$$

+0,5 $\alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} \right),$
$$F_{yi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_d \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_i)^2 + (v_1 - v_i)^2} \times \\ \times (v_1 - v_i) + \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right),$$

+0,5 $\alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{\partial v_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial v_i}{\partial y} \right),$

Известия МГТУ «МАМИ», № 1(47), 2021

$$C_{di} = \frac{24}{\text{Re}_{i1}} + \frac{4}{\text{Re}_{i1}^{0.5}} + 0, 4, \ M_{i1} = \left|\overline{V_1} - \overline{V_i}\right| / c,$$

$$\text{Re}_{i1} = \rho_1 \left|\overline{V_1} - \overline{V_i}\right| 2r_i / \mu, \ \text{Pr} = C_p \mu / \lambda,$$

$$Q_i = 3\alpha_i \alpha_i^T (T_1 - T_i) / r_i, \ i = 2, ..., n.$$

Одним из важных параметров динамики многофазных сред является объемное содержание дисперсной фазы, отношение объема компоненты смеси к общему объему смеси $\alpha_i = V_i / V$, при этом физическая плотность материала дисперсной фазы представляется неизменной. Для описания процесса коагуляции частиц использовалась математическая модель столкновительной коагуляции [4]:

$$\frac{dm_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} N_j m_j, \frac{dN_i}{dt} = -N_i \sum_{j=i+1}^n k_{ij} N_j.$$
(6)

В уравнении (6) *m*_i и *N*_i – масса и концентрация частиц *i*-ой фракции,

$$\alpha_i = \frac{4}{3}\pi N_i r_i^3, \ \theta_j = \operatorname{arctg}(v_j / u_j),$$

$$k_{ij} = \frac{\pi}{4} (d_i + d_j)^2 \left[u_i \cos(\theta_j) + v_i \sin(\theta_j) - \sqrt{u_j^2 + v_j^2} \right]$$

Изменение составляющих скорости і-ой фракции дисперсной фазы определяется следующими уравнениями:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} \left(u_j - u_i \right) m_j N_j,$$

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} \left(v_j - v_i \right) m_j N_j,$$

$$\frac{d}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial}{\partial x} + v_i \frac{\partial}{\partial y}.$$

Температура частиц *i*-ой фракции после поглощения более мелких частиц находится из уравнения:

$$T_{i}^{*} = \frac{1}{C_{i}m_{i}^{*}} (\sum_{j=1}^{i-1} k_{ij}N_{j}C_{j}m_{j}T_{j} + C_{i}m_{i}T_{i}).$$

Наличие в газокапельном потоке процессов коагуляции характеризуется безразмерным параметром числом Вебера – рассматривается число Вебера $We_i = 2\rho_1 r_i |\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_i|^2 / \sigma$, где σ-коэффициент поверхностного натяжения жидкости, из которой сформированы капли аэрозоля, р₁ – плотность несущей среды. В моделируемых процессах относительные числа Вебера для фракций дисперсной фазы имеют значение меньше критическо-

го $We_{\rm kp} \approx 10$. Для составляющих скорости компонент смеси задавались однородные граничные условия Дирихле. Для остальных функций динамики многофазной смеси задавались однородные граничные условия Неймана.

Система уравнений динамики многофазной среды (1)-(5) решалась двухэтапным явным конечно-разностным методом Мак-Кормака, позволяющим получать решения второго порядка точности [11].

Рассмотрим применение численного алгоритма на примере скалярного нелинейного уравнения в частных производных (7):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial a(f)}{\partial x} + \frac{\partial b(f)}{\partial y} = c(f).$$
(7)

Алгоритм ЯВНОГО конечно-разностного метода Мак-Кормака для нелинейного уравнения (7) имеет вид (8)–(9):

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

$$f_{j,k}^{n+1} = 0,5(f_{j,k}^{n} + f_{j,k}^{*}) - 0,5\frac{\Delta t}{\Delta x} \left(a_{j,k}^{*} - a_{j-1,k}^{*} \right) - 0,5\frac{\Delta t}{\Delta y} \left(b_{j,k}^{*} - b_{j,k-1}^{*} \right) + 0,5\Delta t c_{j,k}^{*}.$$
(9)

Здесь Δx , Δy – шаги по пространственным направлениям, Δt – шаг по времени.

После каждого временного шага для получения монотонного численного решения применялась схема нелинейной коррекции численного решения [12].

Результаты расчетов

В расчетах задавались следующие параметры моделируемого процесса. Дисперсная фаза газовзвеси состояла из двух фракций с диаметрами частиц d = 2 мкм и d = 200 мкм, объемными содержаниями каждой фракции $\alpha_2 = \alpha_3 =$ 0,005 с дисперсными включениями, равномерно распределенными по всей емкости, для начального момента времени физической плотностью материала частиц $\rho_{20} = \rho_{30} = 1000$ кг/м³. При t = 0 поршень начинал движение по гармоническому закону $x(t) = A \cdot \sin(w \cdot t)$, где ω – циклическая частота первого линейного резонанса колебаний в закрытой трубе, $\omega = \pi c/L$ [13]. На рис. 1 схематически изображен акустический резонатор. Высота акустического резонатора – L = 06938 м, диаметра трубы – h = 0,1 м. Расчетные параметры сетки – 200 узлов в направлении *у* и 40 узлов в направлении *х*.



Рис. 1. Схематическое изображение акустического резонатора

Fig. 1. Schematic representation of an acoustic resonator

Схема данного резонатора использована в физическом эксперименте [8]. Вертикальное расположение канала, в котором происходят колебания аэрозоля, объясняется тем, что при таком расположении акустического резонатора процесс гравитационного осаждения более длительный. Пространственное распределение у-составляющей скорости газа при колебаниях двухфракционной газовзвеси представлено на рис. 2, на поверхности поршня и на закрытом конце канала наблюдаются минимальные значения скорости, наибольшее значение у-составляющая скорости газа достигает вблизи середины канала. Колебания столба газа в однородном газе и в аэрозоле отличаются интенсивностью (рис. 3), что вызвано межфазным взаимодействием несущей среды и дисперсной фазы. При амплитудах хождения поршня A = 0,05 см и A = 0,1 см величины изменения *у*-составляющей скорости газа в двухфракионной газовзвеси составляют, соответственно, 0,69 и 0,715 от величин изменения *у*-составляющей скорости газа при соответствующих амплитудах хождения поршня. Таким образом, при возбуждении поршнем более интенсивных колебаний влияние дисперсной фазы является менее существенным.



Рис. 2. Пространственное распределение у-составляющей скорости газа в момент времени t = 0,62 с

Fig. 2. Spatial distribution of the y-component of the gas velocity at the moment of time t = 0,62 c

Для фракций крупных частиц скорости колебаний имеют существенное отличие от скорости колебаний мелкодисперсных частиц, при этом мелкодисперсные частицы имеют несущественные скоростные отличия в сравнении с несущей средой (рис. 4). На рис. 5 изображены временные зависимости объемных содержаний фракций дисперсной фазы. Из рисунка следует, что массоперенос частиц крупной фракции происходит с большей интенсивностью. Так как для более крупных капель за счет их большей инерционности возникают условия несимметричности передачи импульса капле на фазах сжатия и разрежения при волновых колебаниях газа [9, 14], усиливается дрейф дисперсных включений. На рис. 6 представлены временные зависимости объемного содержания фракций дисперсной фазы, полу-



Fig. 3. Time dependences of the gas velocity in a two-component gas suspension for different amplitudes of piston stroke. Calculations obtained by the model of a homogeneous viscous gas: curve 1 – piston stroke amplitude A = 0,05 cm, curve 3 – piston stroke amplitude A = 0,1 cm. Calculations obtained by the model of a two-fraction gas suspension: curve 2 – piston stroke amplitude A = 0,05 cm, curve 4 – piston stroke amplitude A = 0,1 cm



Рис. 4. Временная зависимость у-составляющей скорости компонент смеси:

кривая 1 – несущая среда; кривая 2 – фракция дисперсной фазы с размером частиц d = 2 мкм; кривая 3 – фракция дисперсной фазы d = 200 мкм в точке x = h/2, y = L/20

Fig. 4. Time dependence of y velocity component of the mixture components, curve 1 – carrier medium; curve 2 – fraction of the dispersed phase with a particle size of $d = 2 \mu m$; curve 3 – fraction of the dispersed phase $d = 200 \mu m$ at the point x = h/2, y = L/20



Рис. 5. Временные зависимости величины объемных содержаний:

мелкодисперсной фракции d = 2 мкм – кривая 1 – и крупнодисперсной фракции d = 200мкм – кривая 2 – в точке x = h/2, y = L/20





Рис. 6. Временные зависимости объемного содержания фракций дисперсной фазы в точке $x = h/2, y = \hat{L}/20.$ Объемные содержания фракций частиц дисперсной фазы при возбуждении колебаний с амплитудой хождения поршня A = 0.5 см: кривая 1 — частицы с размером d = 2 мкм; кривая 2 – частицы с размером d = 200 мкм. Объемные содержания фракций частиц дисперсной фазы при возбуждении колебаний с амплитудой хождения поршня A = 1 см: кривая 3 – частицы с размером d = 2 мкм; кривая 4 – частицы с размером d = 200 мкм Fig. 6. Time dependences of the volumetric content of the dispersed phase fractions at the point x = h/2, y = L/20. The volumetric content of fractions of particles of the dispersed phase upon excitation of oscillations with an amplitude of piston movement

A = 0,5 cm; curve I – particles with a size of $d = 2 \ \mu m$; curve 2 – particles with a size of $d = 200 \ \mu m$. Volumetric content of fractions of dispersed phase particles upon excitation of oscillations with the amplitude of piston travel A = 1 cm; curve 3 – particles with a size of $d = 2 \ \mu m$; curve 4 – particles with a size of $d = 200 \ \mu m$ ченные расчетами математической модели, учитывающей коагуляцию частиц. За счет поглощения мелких частиц крупными наблюдается монотонный рост объемного содержания фракции крупных частиц и монотонное убывание объемного содержания мелких частиц.

На рис. 7 представлены численные расчеты пространственных распределений объемного содержания фракций дисперсной фазы газовзвеси, полученные при моделировании колебаний с различной интенсивностью хождения поршня для математической модели, не учитывающей коагуляции капель. При большей интенсивности возбуждения колебаний среды вблизи поршня (вблизи узла стоячей волны поля скорости для первого линейного резонанса в закрытой трубе) область повышенной



Рис. 7. Пространственное распределение объемного содержаний фракций газовзвеси вдоль оси x = h/2 в момент времени t = 0,62 с.
Объемные содержания фракций частиц дисперсной фазы при возбуждении колебаний с амплитудой хождения поршня A = 0,5 см: кривая 1 – частицы с размером d = 2 мкм; кривая 2 – частицы с размером d = 200 мкм.
Объемные содержания фракций частиц дисперсной фазы при возбуждении колебаний с амплитудой хождения поршня A = 1 см: кривая 3 – частицы с размером d = 2 мкм; кривая 3 – частицы с размером d = 2 мкм; кривая 4 – частицы с размером d = 200 мкм

Fig 7. Spatial distribution of the volumetric content of the gas suspension fractions along x = h/2at the time t = 0,62 s. The volumetric content of fractions of particles of the dispersed phase upon excitation of oscillations with an amplitude of piston movement A = 0,5 cm; curve 1 - particleswith a size of $d = 2 \mu m$; curve 2 - particleswith a size of $d = 200 \mu m$. The volumetric content of fractions of particles of the dispersed phase upon excitation of oscillations with an amplitude of piston movement A = 1 cm; curve 3 - particleswith a size of $d = 2 \mu m$; curve 4 - particleswith a size of $d = 2 \mu m$; curve 4 - particleswith a size of $d = 200 \mu m$ концентрации [9, 14] крупнодисперсных частиц формируется более интенсивно.

Расчеты объемных содержаний фракций дисперсной фазы с учетом влияния коагуляции представлены на рис. 8. Увеличение интенсивности хождения поршня приводит к интенсификации процесса коагуляции частиц – увеличению объемного содержания крупнодисперсной фракции и уменьшению объемного содержания мелкодисперсной фракции.

Выводы

В результате численного моделирования было выявлено, что в процессе колебаний полидисперсной газовзвеси вблизи узла стоячей волны поля скорости газа формируется область с повышенным содержанием крупноди-



Рис. 8. Пространственное распределение объемного содержаний фракций газовзвеси вдоль оси x = h/2 в момент времени t = 0,62 с.
Объемные содержания фракций частиц дисперсной фазы при возбуждении колебаний с амплитудой хождения поршня A = 0,05 см:
кривая 1 – частицы с размером d = 2 мкм; кривая 2 – частицы с размером d = 200 мкм.
Объемные содержания фракций частиц дисперсной фазы при возбуждении колебаний с амплитудой хождения поршня A = 1 см:
кривая 3 – частицы с размером d = 2 мкм; кривая 3 – частицы с размером d = 2 мкм;

Fig. 8. Spatial distribution of the volumetric content of the gas suspension fractions along the – x = h/2 axis at the time t = 0,62 s. Volumetric content of fractions of dispersed phase particles upon excitation of oscillations with a piston stroke amplitude A = 0.05 cm; curve 1 - particles with a size of $d = 2 \mu m$; curve 2 - particles with a size of $d = 200 \mu m$. Volumetric content of fractions of dispersed phase particles upon excitation of oscillations with the amplitude of piston travel A = 1 cm; curve 3 - particles with a size of $d = 2 \mu m$;

A = 1 cm; curve 3 – particles with a size of d = 2 MKM, curve 4 – particles with a size of $d = 200 \ \mu m$ сперсных частиц. При увеличении амплитуды хождения поршня интенсивность формирования области с повышенным содержанием крупнодисперсных частиц возрастает. Учет коагуляции капель аэрозоля демонстрирует то, что за счет поглощения мелких капель крупными каплями происходит монотонное увеличение объемного содержания крупнодисперсных частиц и монотонное уменьшение объемного содержания мелкодисперсных частиц. В области повышенной концентрации крупнодисперсной фракции за счет коагуляции объемное содержание мелкодисперсных частиц существенно уменьшается. Увеличение интенсивности колебаний газа в акустическом резонаторе интенсифицирует процесс коагуляции, увеличивая объемное содержание крупнодисперсной фракции за счет уменьшения объемного содержания мелкодисперсных частиц.

Литература

- Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1 Наука, 1987. 464 с.
- 2. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб.: Недра. 2003. 284 с.
- Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газовзвесях частиц металлов. 2015. Новосибирск. 301 с.
- Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П., Худяков В.А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник в 5-ти томах. Т. 1. Методы расчета. Москва: Изд-во ВИНИТИ, 1971. 267 с.
- Покусаев Б.Г., Таиров Э.А., Таирова Е.В., Некрасов Д.А., Васильев С.А. Исследование равновесной скорости звука парожидкосной среды с зернистым слоем с учетом теплофизических свойств засыпки Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012. Т. 4. № 2. С. 47–55.
- Федяев В.Л. Математическое моделирование и оптимизация градирен // Труды Академэнерго. 2009. № 3. С. 91–107.
- Тонконог В.Г., Коченков А.Г., Кусюмов С.А. Кавитационный парогенератор для опреснительной установки // Труды Академэнерго. 2011. № 2. С. 33–39.
- Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. Динамика табачного дыма при резонансных колебаниях в закрытой трубе // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 2. С. 312–315.

- Тукмаков А.Л. Зависимость механизма дрейфа твердой частицы в нелинейном волновом поле от ее постоянной времени и длительности прохождения волновых фронтов // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 4. С. 106–115.
- Тукмаков А.Л., Баянов Р.И., Тукмаков Д.А. Течение полидисперсной газовзвеси в канале, сопровождающееся коагуляцией в нелинейном волновом поле // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 3. С. 319–325.
- 11. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей в 2-х томах. Т. 2. Москва: Мир, 1991, 552 с.
- Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа // Математическое моделирование. 1993. № 3. С. 74–83.
- Горелик Г.С. Колебания и волны. М.: Физ.-мат. ГИЗ. 1959. 572 с.
- 14. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1984. 403 с.

References

- Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred [Dynamics of multiphase media]. CH. 1 Nauka Publ., 1987. 464 p.
- 2. Kutushev A.G. Matematicheskoye modelirovaniye volnovykh protsessov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh [Mathematical modeling of wave processes in aerodispersed and powdery media]. SPb.: Nedra Publ.. 2003. 284 p.
- Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel' T.A. Volnovyye protsessy v gazovzvesyakh chastits metallov [Wave processes in gas suspensions of metal particles]. 2015. Novosibirsk. 301 p.
- Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P., Khudyakov V.A. Termodinamicheskiye i teplofizicheskiye svoystva produktov sgoraniya [Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products]: spravochnik v 5-ti tomakh. Vol. 1. Metody rascheta. Moscow: Izd-vo VINITI Publ., 1971. 267 p.
- Pokusayev B.G., Tairov E.A., Tairova YE.V., Nekrasov D.A., Vasil'yev S.A. Investigation of the equilibrium speed of sound of a vapor-liquid medium with a granular layer taking into account the thermophysical properties of the backfill. Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI. 2012. Vol. 4. No 2, pp. 47–55 (in Russ.).
- Fedyayev V.L. Cooling tower mathematical modeling and optimization. Trudy Akadem energo. 2009. No 3, pp. 91–107 (in Russ.).

- Tonkonog V.G., Kochenkov A.G., Kusyumov S.A. Cavitation steam generator for desalination plant. Trudy Akadem energo. 2011. No 2, pp. 33–39 (in Russ.).
- Gubaydullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A., Shaydullin L.R. Dynamics of tobacco smoke with resonant vibrations in a closed pipe. Teplofizika vysokikh temperatur. 2019. Vol. 57. No 2, pp. 312–315 (in Russ.).
- Tukmakov A.L. Dependence of the drift mechanism of a solid particle in a nonlinear wave field on its time constant and the duration of the passage of wave fronts. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2011. Vol. 52. No 4, pp. 106–115 (in Russ.).
- 10. Tukmakov A.L., Bayanov R.I., Tukmakov D.A. Flow of a polydisperse gas suspension in a channel

accompanied by coagulation in a nonlinear wave field. Teplofizika i aeromekhanika. 2015. Vol. 22. No 3, pp. 319–325 (in Russ.).

- Fletcher K. Vychislitel'n-yye metody v dinamike zhidkostey [Computational methods in fluid dynamics]. V 2-kh tomakh, Vol. 2, Moscow: Mir Publ., 1991, 552 p.
- Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. Application of compact difference schemes to the study of unsteady flows of a compressible gas. Matematicheskoye modelirovaniye. 1993. No 3, pp. 74–83 (in Russ.).
- 13. Gorelik G.S. Kolebaniya i volny [Oscillations and waves]. Moscow: Fiz.-mat. GIZ Publ. 1959. 572 p.
- 14. Krasil'nikov V.A., Krylov V.V. Vvedeniye v fizicheskuyu akustiku [Introduction to physical acoustics]. Moscow: Nauka Publ. 1984. 403 p.

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF DROPLET COAGULATION INTENSITY ON POLYDISPERSE AEROSOL FRACTION DISTRIBUTION

D.A. Tukmakov

Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia tukmakovDA@imm.knc.ru

The paper is devoted to the study of the effect of the intensity of aerosol fluctuations on the distribution of fractions of the dispersed component of the coagulating aerosol. Oscillations of aerosol in closed channel are numerically modeled in operation. To describe the dynamics of the carrier medium, a two-dimensional non-stationary system of Navier-Stokes equations for compressed gas is used. They are written taking into account interfacial power interaction and interfacial heat exchange. To describe the dynamics of the dispersed phase, a system of equations is solved for each of its fractions. It includes an equation of continuity for the "average density" of the fraction, equations of preservation of spatial components of the pulse and an equation of preservation of thermal energy of the fraction of the dispersed phase of the gas suspension. Phase-to-phase power interaction included Archimedes force, attached mass force, and aerodynamic drag force. Heat exchange between the carrier medium-gas and each of the fractions of the dispersed phase was also taken into account. The mathematical model of dynamics of polydisperse aerosol was supplemented by the mathematical model of collision coagulation of aerosol. For the velocity components of the mixture, uniform Dirichlet boundary conditions were set. For the remaining functions of the dynamics of the multiphase mixture, uniform Neumann boundary conditions were set. The equations were solved by the explicit McCormack method with a nonlinear correction scheme that allows to obtain a monotone solution. As a result of numerical calculations, it was determined that in the vicinity of the oscillating piston, an area with an increased content of coarse particles is formed. The coagulation process results in a monotonous increase in volume content of the coarse particle fraction and a monotonous decrease in volume content of fine particles. Increasing the intensity of gas fluctuations leads to intensification of the process of coagulation of aerosol droplets.

Keywords: multiphase media, numerical modeling, polydisperse aerosol, interfacial interaction, coagulation.

Cite as: Tukmakov D.A. Numerical study of the effect of droplet coagulation intensity on polydisperse aerosol fraction distribution. Izvestiya MGTU «MAMI». 2021. No 1 (47), pp. 73–80 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-73-80.