

УДК 629.12.03

БАСОК Б.И.¹,
РЫЖКОВ С.С.¹, ГОНЧАРОВА Н.А.²¹Институт технической теплофизики НАН Украины²Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

ОСАЖДЕНИЕ ЖИДКИХ ЧАСТИЦ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ТРЕУГОЛЬНЫХ КАНАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР

Досліджено вплив неізотермічності на характеристики дисперсного двофазного потоку у трикутному каналі. Температурне поле не впливає на гідродинамічні характеристики потоку в коагуляторі при діапазоні температур 0...100 °С для швидкості потоку 0...15 м/с, а впливає на концентрацію дисперсної фази при проходженні коагулятора. При низьких швидкостях (менш за 1 м/с) підвищується значення коефіцієнта уловлювання при $\Delta T = 80$ °С на 12 % у порівнянні з ізотермічними умовами. При швидкостях 2...10 м/с цей ефект знижується і становить менш як 1...5 %.

Исследовано влияние неізотермичности на характеристики дисперсного двухфазного потока в треугольном канале. Температурное поле не влияет на гидродинамические характеристики потока в коагуляторе при диапазоне температур 0...100 °С для скорости потока 0...15 м/с, а влияет на концентрацию дисперсной фазы при прохождении коагулятора. При низких скоростях (менее 1 м/с) повышается значение коэффициента улавливания при $\Delta T = 80$ °С на 12 % по сравнению с изотермическими условиями. При скоростях 2...10 м/с этот эффект снижается и составляет менее 1...5 %.

We study the influence of temperature drop on the characteristics of disperse two-phase flow in a triangular channel. The temperature field does not influence the flow hydrodynamic characteristics in the channel in a temperature range of 0... 100 °C, for an inlet velocity of 0...15 m/sec, but influences the outlet concentration of the disperse phase. At a low velocity (less than 1 m/sec) the efficiency of sedimentation increases by 12% at $\Delta T = 80$ °C in comparison with isothermal conditions. At a velocity of 2...10 m/sec, the effect is reduced and is less than 1...5 %.

C – коефіцієнт, теплоємкість;
 D – диффузія, термофоретический коефіцієнт;
 d – діаметр;
 E – енергія;
 k – кінетическа енергія турбулентності, коефіцієнт молекулярної теплопровідності;
 F – сила для одиниці маси частини;
 m – маса;
 P – генерація напружень, тиск;
 Pr – число Прандтля;
 Re – число Рейнольдса;
 T – температура;
 t – час;
 u – швидкість;
 u' – пульсаційна складова швидкості;
 x – координата;
 ε – дисипація енергії;

η_{Σ} – коефіцієнт уловлювання частини;
 μ – в'язкість;
 ρ – густина;
 τ – тензор напружень.

Індекси:

0 – початковий стан;
 i, j, k – індекси координати і векторних величин, рівні 1 і 2;
 D – обумовлено опору;
 L – молекулярний;
 P – тиск потоку;
 p – частини;
 T – турбулентний;
 w – стінка;
 μ – стосується до в'язкості;
 k – колектор.

Введение

Разработка методов интенсификации переноса дисперсной фазы в элементах теплооб-

менного оборудования позволяет снижать его габариты и экономить энергетические и материальные ресурсы. Одним из методов повышения эффективности улавливания высокодисперсных

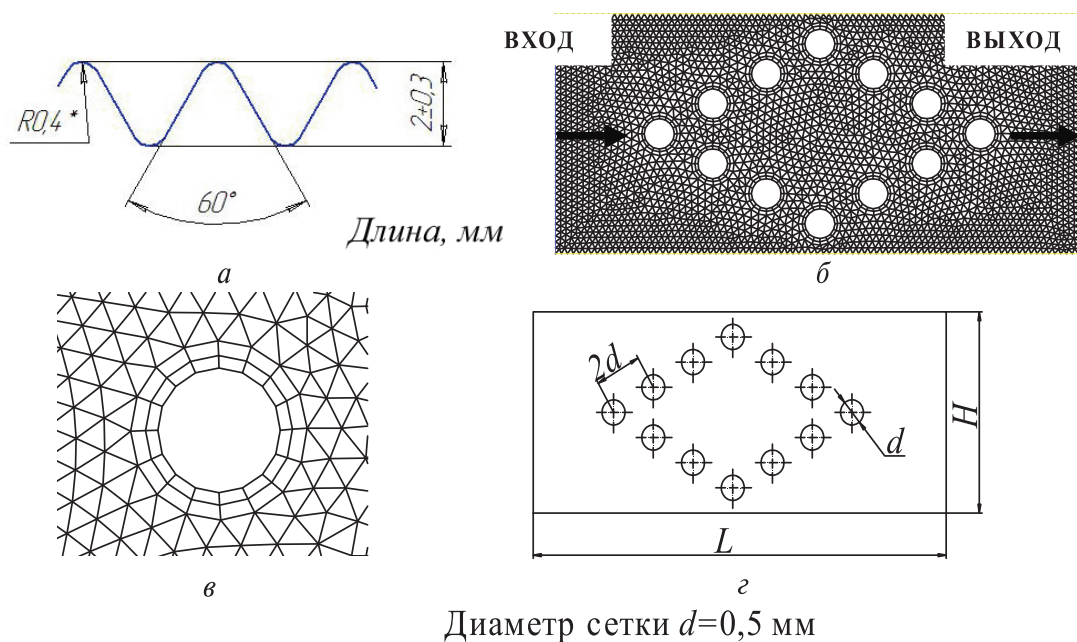


Рис. 1. Геометрия расчетного канала $L = 9$ мм, $H = 4$ мм: а – схема гофрированного коагулятора; б – расчетная сетка; в – пристенный слой; г – геометрия расчетной сетки.

частиц является использование сеточных гофрированных коагуляторов, которые достаточно изучены в изотермических условиях [1, 2]. Создание неизоотермических условий протекания дисперсной двухфазной среды в сеточных коагуляторах позволяет интенсифицировать осаждение частиц за счет сил термофореза [3] и конденсировать пары веществ.

Методы исследований

Для исследования теплофизических и гидродинамических характеристик дисперсной двухфазной среды в элементе сепарационного оборудования используется расчетный пакет FLUENT 6.3 (ANSYS, Inc) – современный универсальный программный комплекс, предназначенный для решения задач механики жидкостей и газов. В процессе решения используется неструктурированная сеточная технология. Для двухфазных течений используется модель дискретной фазы (DPM).

Для расчета газодинамики в элементе сепарационного оборудования (в треугольном канале) использовалась теплофизическая модель напряжений Рейнольдса и модель движения частиц [4]. Верификация выбранной теплофизической мо-

дели осуществлена на основе сопоставления экспериментальных данных и расчетных значений, полученных при исследовании плоских и цилиндрических каналов истечения [2].

Расчетная сетка канала строилась с помощью треугольных сегментов площадью $S = 30 \cdot 10^{-8}$ м². Пристенный слой сетки цилиндров смоделирован с помощью прямоугольных сегментов. Высота каждого прямоугольника пропорционально уменьшается с приближением к стенке (рис. 1). Высота ближайшего к стенке слоя составляет $h = 0,05$ мм.

Сеточный гофрированный коагулятор представляет собой элемент тонкой очистки от высокодисперсных аэрозолей очистных устройств [1]. Расчет сеток треугольного элемента коагулятора проводился в двумерной постановке задачи.

Представление результатов расчета для коагулятора проводилось по аналогии с исследованиями цилиндрического и плоского канала [2]. Входная температура дисперсной двухфазной среды принималась равной 100 °С, а стенок канала – 20 °С. Это обеспечивало перепад температур ΔT до 80 °С. Входная концентрация дисперсной фазы (аэрозольных частиц) составляла 100 мг/м³, расчетный минимальный диаметр частиц – $1 \cdot 10^{-6}$ м, а максимальный – $3 \cdot 10^{-6}$ м. Исследо-

вался диапазон начальных скоростей от 0,1...0,5 и 1...15 м/с.

Для точности расчетов в программном пакете использовался критерий сходимости 10^{-4} для переменных скорости, условия неразрывности, кинетической энергии турбулентности и напряжений Рейнольдса, а для энергии -10^{-7} .

Расчет гидродинамических, теплофизических характеристик, а также процессов осаждения высокодисперсных частиц осуществлялся для стационарных условий.

Теплофизическая модель процесса. Используемая теплофизическая модель процессов переноса частиц в канале основана на транспортном уравнении напряжений Рейнольдса с расчетом индивидуальных напряжений $(u'_i u'_j)$ и имела вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho u_k u'_i u'_j}) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu_L \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] - \\ - 2\mu_L \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}. \end{aligned}$$

По аналогии с транспортным уравнением напряжений Рейнольдса для учета неизоэнтальных параметров процесса выполнен расчет конвективного теплопереноса с помощью уравнения энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] &= \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{C_p \mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right], \end{aligned}$$

где τ рассчитывался как

$$\tau = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij},$$

где $\mu_{eff} = \mu_T + \mu_L$.

Для моделирования траекторий дисперсных частиц двухфазной среды решали уравнение движения [4], которое учитывало силу инерции частицы и другие основные силы, воздействующие

на нее. В декартовых координатах это уравнение записывалось следующим образом:

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D + \frac{g_x (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i,$$

где F_D – сила сопротивления для единицы массы частицы:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D}{24} Re,$$

$$Re = \rho d_p \frac{|u_p - u|}{\mu},$$

где F_i – дополнительные силы, воздействующие на частицу.

Коэффициент сопротивления C_D рассчитывался следующим образом:

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + b_1 Re^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re},$$

где b_i – полиномиально задаваемые коэффициенты.

Уравнение учитывает дополнительные силы F_i , которые действуют на частицу. Для учета осаждения частиц под действием силы инерции необходимо учитывать ускорение потока, обтекающего частицу. Сила инерции рассчитывается следующим образом:

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_k} \frac{\partial}{\partial t} (u - u_k).$$

Поперечное смещение частиц может быть вызвано не только градиентом осредненной скорости газа, но и неоднородностью поля его пульсационных скоростей. Неравномерность профиля скорости приводит к направленному смещению частицы в сторону уменьшения интенсивности пульсаций. Этот эффект, обычно именуемый турбулентной миграцией или турбофорезом, рассчитывается по формуле

$$F_2 = -0,5m_k \frac{\partial \overline{u_k'^2}}{\partial y}.$$

Дополнительная сила переноса частиц появляется в случае возникновения перепада давле-

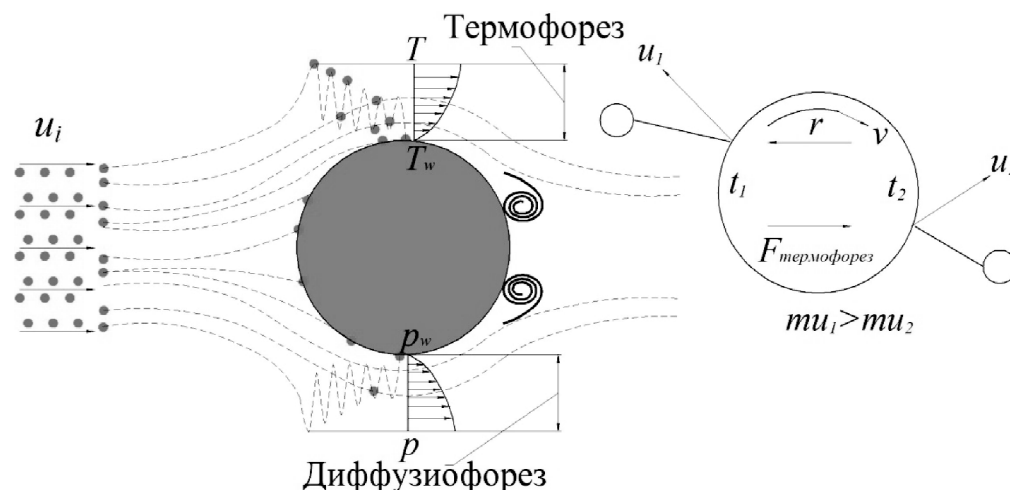


Рис. 2. Схема действия сил термофореза и диффузиофореза на частицы.

ния и называется диффузиофоретической силой, которую можно рассчитать по формуле

$$F_3 = \left(\frac{P}{P_w} \right) u_k \frac{\partial u}{\partial x}.$$

В процессе исследования интенсификации осаждения высокодисперсного аэрозоля за счет тепловых эффектов в рабочем канале создаются градиентные поля температур. Перепад температур достигается путем охлаждения стенок и коагуляционных поверхностей рабочего канала.

При течении потоков дисперсной двухфазной среды в неизотермических условиях возникает температурная неравномерность, которая также оказывает воздействие на движение частиц. Известно, что в неоднородном температурном поле частицы стремятся двигаться из более нагретых областей в более холодные. Это явление, называется термофорезом [2, 3, 5]. Возникновение силы термофореза связано с тем, что в неоднородном температурном поле молекулы,двигающиеся к частице из нагретых и холодных областей, сообщают ей различный по величине импульс (см. рис. 2).

Очевидно, что эффект должен зависеть от средней скорости молекул и от их числа. Для улавливания капель конденсационного происхождения (менее 2 мкм) и паров перспективно использование сил термофореза, возникающих при существовании температурного гра-

диента, рис. 2. Броуновское движение частиц горячего газа тем интенсивнее, чем выше температура. Это приводит к тому, что с горячей стороны молекулы более интенсивно «бомбардируют» частицу и заставляют ее двигаться к более холодной стенке. В неизотермическом турбулентном потоке градиенты температуры газа и скорости его течения являются функцией координаты. Поэтому дополнительное осаждение за счет термофореза наблюдается в пристенной области потока, наименьшее – в центральной части. Такие градиенты могут возникать как за счет охлаждения, так и подогрева с последующим охлаждением очищаемой двухфазной дисперсной среды или поверхности осаждения.

Силу термофореза F_T для высокодисперсных частиц можно найти из уравнения [1]:

$$F_4 = - \frac{6\pi d_p \mu^2 C_s (k/k_p + C_t \text{Kn})}{\rho(1 + 3C_m \text{Kn})(1 + 2K + 2C_t \text{Kn}) m_p T} \frac{\partial T}{\partial x},$$

где число Кнудсена рассчитывается по формуле

$$\text{Kn} = \frac{2\lambda}{d_p}; \quad C_s = 1,17; \quad C_t = 2,18; \quad C_m = 1,14.$$

В процессе расчета двухфазной среды использовался метод распределения диаметров (Rosin-Rammler) (см. рис. 3), при котором полный диапазон размеров частиц разделен на набор дискретных диапазонов (определяется отдельным потоком и является частью группы).

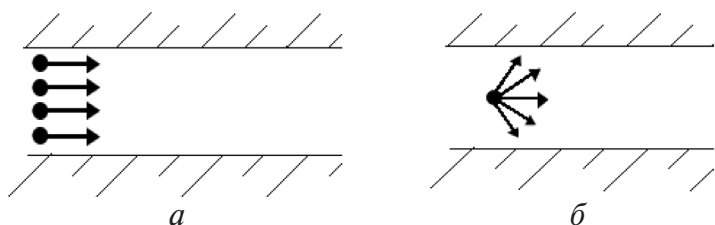


Рис. 3. Впрыск расчетных частиц в потоке методом распределения диаметров (Rosin-Rammler): а, б – способы инжекции.

Результаты исследований

Исследования канала показали, что при прохождении дисперсным двухфазным потоком сеток гофрированного коагулятора происходит равномерное распределение потока по всей его площади. Причем, чем меньше скорость, тем равномернее выравнивается поток (см. рис. 4) и

наблюдается наибольший перепад в расчетном элементе (см. рис. 5).

Расчеты показали, что распределение продольной скорости зависит от диаметра сетки и размера ячейки. Наличие вихреобразования после сеток коагулятора способствует интенсификации осаждения частиц за счет сил турбофореза и зависит от начальной скорости двухфазной среды. Изучение распределения перепада температур в рабочем канале показывает, что снижение скорости позволяет увеличивать эффект осаждения в пристенных слоях под влиянием термофоретической силы (см. рис. 5).

Для интенсификации термофоретического переноса частиц перспективно использовать каналы со значительной поверхностью теплообмена, обладающей хорошей сепарирующей способностью, что можно обеспечить применением неизотермических коагуляторов. В работах [5, 6, 7] представлены результаты экспериментальных

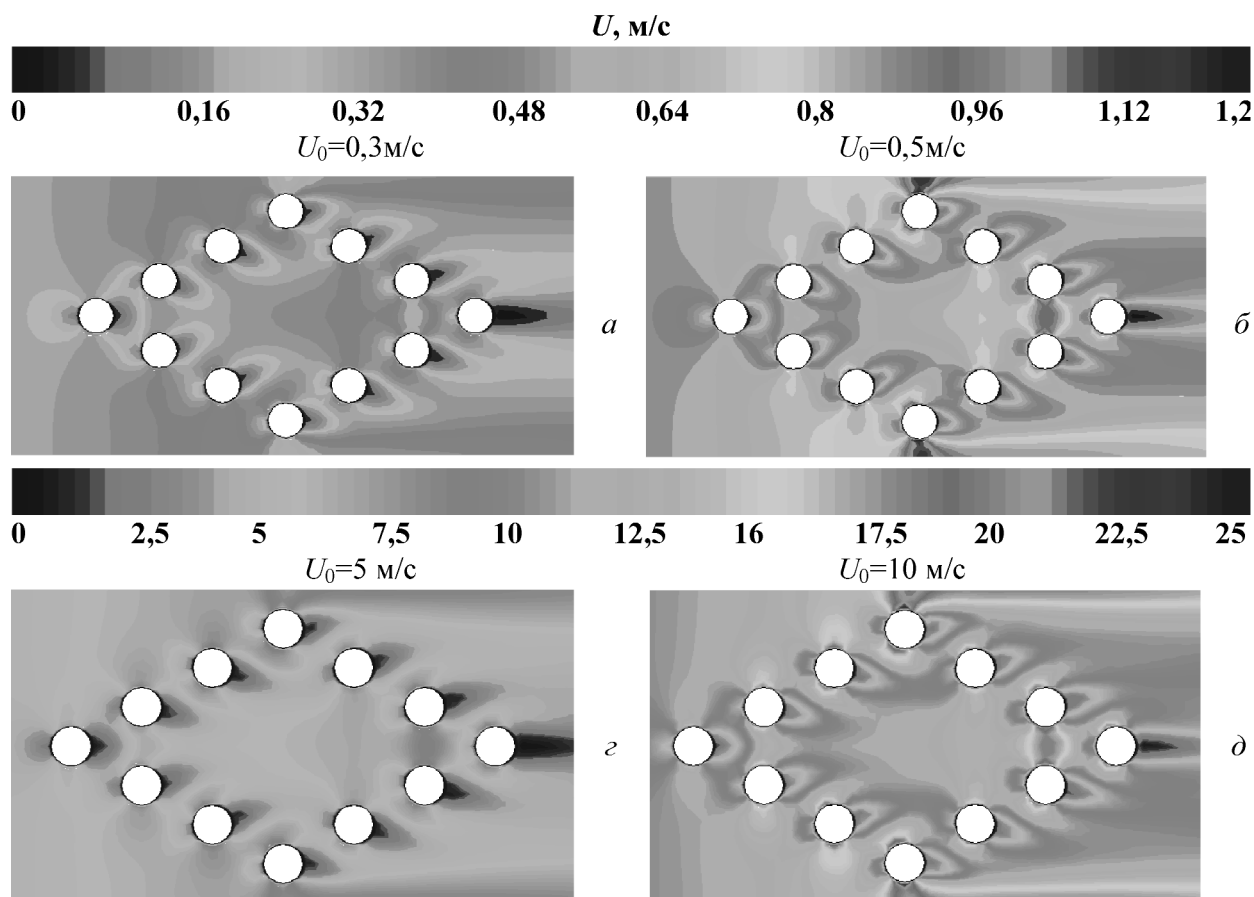


Рис. 4. Распределение скорости в элементе сеточного гофрированного коагулятора в цветовой цифровой гамме при $U_0 = 0, 1... 10$ м/с.

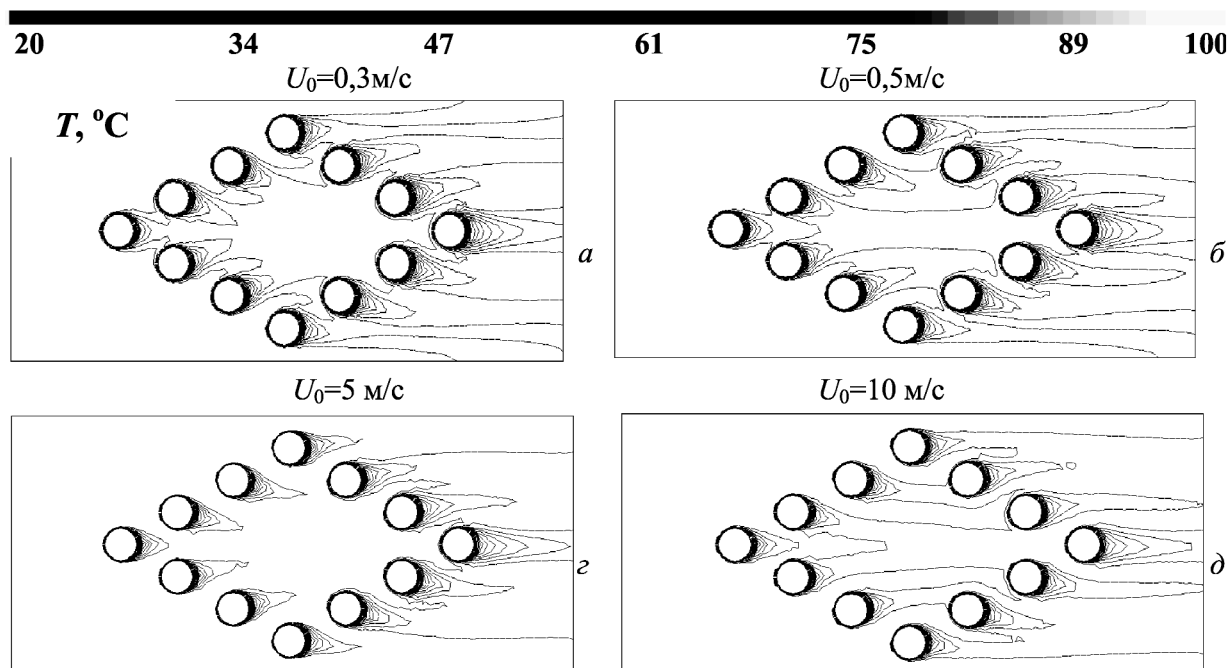


Рис. 5. Распределение температурного поля в элементе сеточного гофрированного коагулятора в цветовой цифровой гамме при $U_0 = 0,1 \dots 10$ м/с.

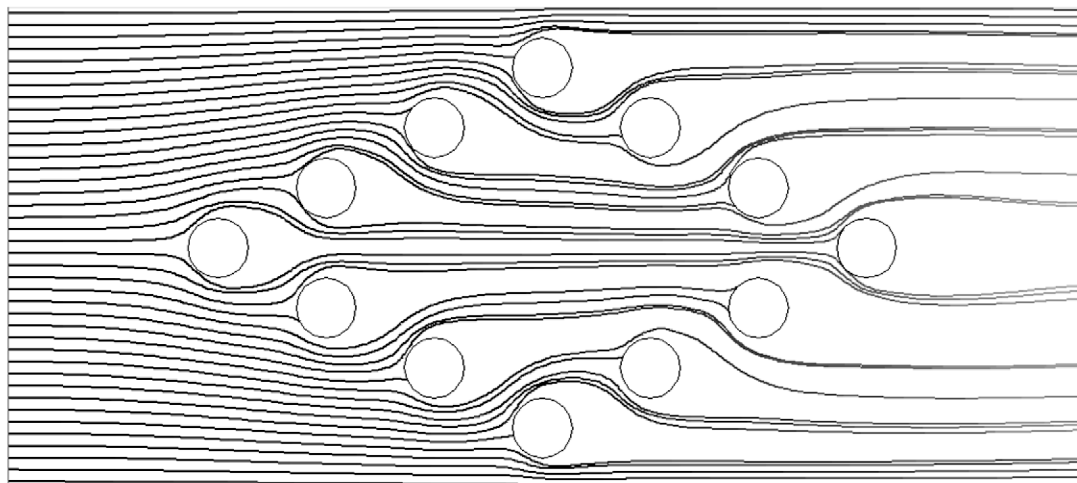


Рис. 6. Расчет траектории движения высокодисперсных частиц в газовом потоке.

исследований неизотермических кольцевых сеточных коагуляторов. Эффективная очистка и охлаждение потока в них наблюдается при количестве рядов сеток до 40. При этом данные по гидродинамической обстановке и распределению температур в таких коагуляторах отсутствуют, что затрудняет проектирование термофоретических очистителей. Это обусловило выполнение дополнительного расчета эффективности улавливания высокодисперсных частиц в рабочем канале.

Из рис. 5 видно, что при прохождении потока через коагулятор происходит снижение температуры при $U_0 = 0,3$ м/с от 100 до 95 °С; при $U_0 = 10$ м/с от 100 до 98 °С (1 мм от стенки коагулятора).

Выполнен расчет траектории движения высокодисперсных частиц в газовом потоке (см. рис. 6). Исследовано влияние неизотермичности на гидродинамические характеристики потока в сеточном коагуляторе. Расчеты показали, что распределение основных гидродинамических характеристик по-

Таблица. Расчет улавливания частиц.

U_0 (м/с)	Число частиц, %	Расчет, $\Delta T = 0^\circ\text{C}$			Расчет, $\Delta T = 80^\circ\text{C}$		
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
0,1	100	6,25	3,75	2,5	11,25	7,5	8,75
0,2	100	8,75	10	6,25	16,25	18,75	17,5
0,3	100	16,25	15	13,75	25	22,5	20
0,4	100	20	17,5	16,25	26,25	25	23,75
0,5	100	21,25	20	18,75	32,5	32,5	31,25
1	100	32,5	30	28,75	33,75	33,75	32,5
2	100	37,5	33,75	31,25	37,5	36,25	35
3	100	45	42,5	41,25	46,25	42,5	45
5	100	55	53,75	50	57,5	53,75	51,25
7	100	57,5	53,75	53,75	57,5	53,75	53,75
10	100	62,5	58,75	55	63,75	58,75	55

тока – скорости, интенсивности турбулентности, кинетической энергии турбулентности, статического давления практически одинаковы для интервала перепада температур от 0 до 80 °С и скорости потока от 0,1 до 15 м/с.

Отмечено влияние перепада температур на дисперсную фазу двухфазной среды. Одной из характеристик дисперсной двухфазной среды является концентрация аэрозольных частиц $C_{\text{вых}}$, которая изменяется при движении в канале за счет осаждения частиц под действием сил различной природы – инерции, турбофореза, термофореза, тяжести и др. Для исследования изменения концентрации дисперсной фазы двухфазного потока производился ее расчет на выходе из сеточного коагулятора (см. таблицу) при заданной входной (100 мг/м³).

Как показали результаты расчета, наибольшее влияние перепада температур (сил термофореза) на движение частиц дисперсной фазы в коагуляторе наблюдается при малых скоростях, что аналогично гладкому каналу [2]. При увеличении скорости потока увеличивается влияние на дисперсную фазу инерционных и турбофоретических сил, а эффект термофореза снижается. Увеличение скорости приводит к росту энергетических затрат и возможному вторичному уносу дисперсной фазы. Так, при $U_0 = 0,1$ м/с: $C_{\text{вых}} = 93,75...97,5$ мг/м³ при $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ и $C_{\text{вых}} = 88,75...92,5$ мг/м³ при среднем перепаде

$\Delta T = 80^\circ\text{C}$. При начальной скорости $U_0 = 10$ м/с неизотермичность незначительно влияет на снижение концентрации масляного аэрозоля в рабочем канале. Так, при $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ – $C_{\text{вых}} = 53,75...57,5$ мг/м³, а при $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ – $C_{\text{вых}} = 55...58,75$ мг/м³.

Наличие перепада температур при низких скоростях (менее 1 м/с) приводит к повышению значения коэффициента улавливания при $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ на 12 % по сравнению с изотермическими условиями. При скоростях 2...10 м/с этот эффект снижается и составляет менее 1...5 %.

Как видно из графика (см. рис.7), при увеличении скорости газового потока ($U_0 \geq 5$ м/с) наблюдается снижение коэффициента улавливания высокодисперсных частиц, что связано с вторичным уносом. Данное явление детально изучено в работах [1, 7].

Как видно из графика, эффективность очистки коагулятором зависит от перепада температур, что подтверждает полученные экспериментальные данные. Так, при $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ и $U_0 = 0,1$ м/с коэффициент улавливания составляет $\eta_\Sigma = 9,2\%$, при $T = 0^\circ\text{C}$ – $\eta_\Sigma = 6,7\%$. При $T = 80^\circ\text{C}$, при $U_0 = 10$ м/с – $\eta_\Sigma = 42,5\%$, при $T = 0^\circ\text{C}$ – $\eta_\Sigma = 42,1\%$. Увеличение скорости снижает эффект термофореза.

Выводы

1. Применена разработанная теплофизическая модель для расчета дисперсных газовых

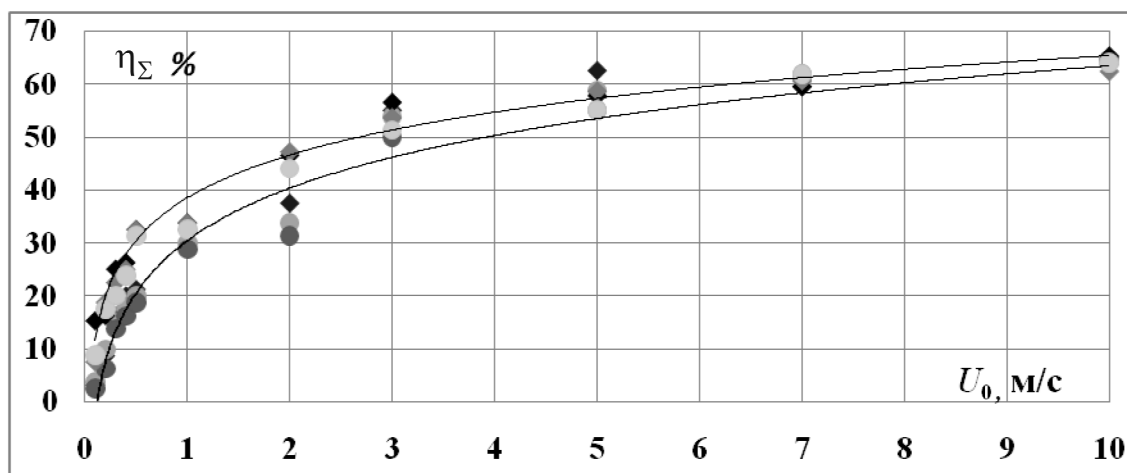


Рис. 7. Зависимость коэффициента улавливания рабочим каналом от начальной скорости потока:
 ● – $\Delta T = 0$ °C; ◆ – $\Delta T = 80$ °C.

потоков в неизотермических условиях. Исследовано влияние неизотермичности на характеристики дисперсного двухфазного потока в элементе гофрированного коагулятора. Температурное поле не влияет на гидродинамические характеристики потока в коагуляторе при диапазоне температур от 0 до 100 °C для скорости потока от 0,1 до 15 м/с, а влияет на концентрацию дисперсной фазы при прохождении коагулятора.

2. Расчетным способом подтверждены экспериментальные данные о повышении эффективности улавливания высокодисперсных частиц в сеточных коагуляторах. При низких скоростях (менее 1 м/с) – приводит к повышению значения коэффициента улавливания при $\Delta T = 80$ °C на 12% по сравнению с изотермическими условиями. При скоростях 2...10 м/с этот эффект снижается и составляет менее 1...5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжков С.С., Басок Б.И. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред // Промышленная теплотехника. – 2001. – 23, №4–5. – С. 141–145.

2. Басок Б.И., Рыжков С.С. Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале // Промышленная теплотехника. – 2006. №3. – С. 141–145.

3. L. Talbot et al. Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer // J. Fluid Mech., 101(4):737-758, 1980 (термофорез).

4. H. Ounis, G. Ahmadi, and J. B. McLaughlin. Brownian Diffusion of Submicrometer Particles in the Viscous Sublayer // Journal of Colloid and Interface Science. – 1991. – 143 (1). – P. 266–277.

5. Басок Б.И., Рыжков С.С. Термофоретическая очистка воздуха в энергетическом оборудовании // Промышленная теплотехника. – 2003. – 25, №5. – С. 45–50.

6. Басок Б.И., Рыжков С.С. Экспериментальная установка для исследования процессов утилизации дисперсных частиц в двухфазном потоке // Промышленная теплотехника. – 2006. – №4. – С. 141–145.

7. Ryzhkov S.S. “Jet- contact separator of exhaust gases of ship engines” / Proceedings of the third international conference on marine industry. – Varna: Bulgaria, 2001. – 2. – P. 137 – 145.

Получено 07.09.2008 г.