

УДК 629.12.03

БАСОК Б.И., АВРАМЕНКО А.А., РЫЖКОВ С.С.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР НА ПРОЦЕСС УЛАВЛИВАНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ В ГЛАДКОМ КАНАЛЕ

Досліджено вплив перепаду температур на уловлювання високодисперсних часток аерозолю у гладкому каналі. Встановлено неаддитивність процесів осадження часток за рахунок ефектів інерції, турбофорезу і термофорезу. Збільшення уловлювання мікрочастинок за рахунок теплового ефекту становить близько 10 %. Експериментально визначено вплив температури на процес уловлювання дисперсних аерозолів, що дозволяє розраховувати та оптимізувати газоочисні пристрої.

Исследовано влияние перепада температур на улавливание высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале. Установлена неаддитивность процессов осаждения частиц за счет эффектов инерции, турбофореза и термофореза. Увеличение улавливания микрочастиц за счет теплового эффекта составляет около 10 %. Экспериментально определено влияние температуры на процесс улавливания дисперсных аэрозолей, что позволяет рассчитывать и оптимизировать газомоноочистные устройства.

The temperature drops influence on superfine particles aerosol catching in the smooth channel is executed. It non-additivity sedimentation of particles due to effects of inertia, turbophoresis and thermophoresis is studied. The increase in catching of microparticles due to thermal effect makes up to 10 %. Influence of temperatures on process catching of disperse aerosol that will allow to optimize gas moisture purifying devices is experimentally proved.

C – коэффициент, теплоемкость;
 d – диаметр;
 D – диффузия, термофоретический коэффициент;
 G – генерация напряжений, расход;
 H – высота канала;
 E – энергия;
 F – сила для единицы массы частицы;
 k – кинетическая энергия турбулентности, коэффициент молекулярной теплопроводности;
 m – масса
 P – давление;
 t – время;
 T – температура;
 u' – пульсационная составляющая скорости;
 u – осредненная скорость;
 x – координата;
 ε – диссипация энергии;
 ρ – плотность;
 μ – динамический коэффициент вязкости;

η_{Σ} – коэффициент улавливания частиц;
 τ – тензор напряжений;
 Re – число Рейнольдса;
 Pr – число Прандтля;

Индексы:

вх – входной;
 вых – выходной;
 D – обусловлено сопротивлением;
 L – молекулярный;
 k – коллектор;
 p – частица;
 P – давление;
 T – турбулентный;
 eff – эффективный;
 i, j, k – индексы координаты и векторных величин, равные 1 и 2;
 μ – относится к вязкости;
 0 – начальное состояние.

Введение

Аэрозольные выбросы технологических процессов отличаются многообразием происхожде-

ния, различным составом и параметрами. Некоторые выбросы содержат дефицитные материалы, обладают высоко- или низкопотенциальной энергией. Высокопотенциальную энергию по-

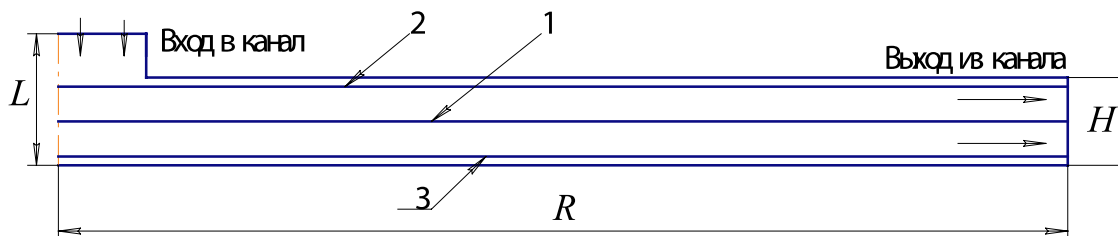


Рис. 1. Геометрия осесимметричного канала: $L = 12$ мм; $R = 200$ мм; 1 – центр канала; 2, 3 – расстояние 1 мм от стенок канала.

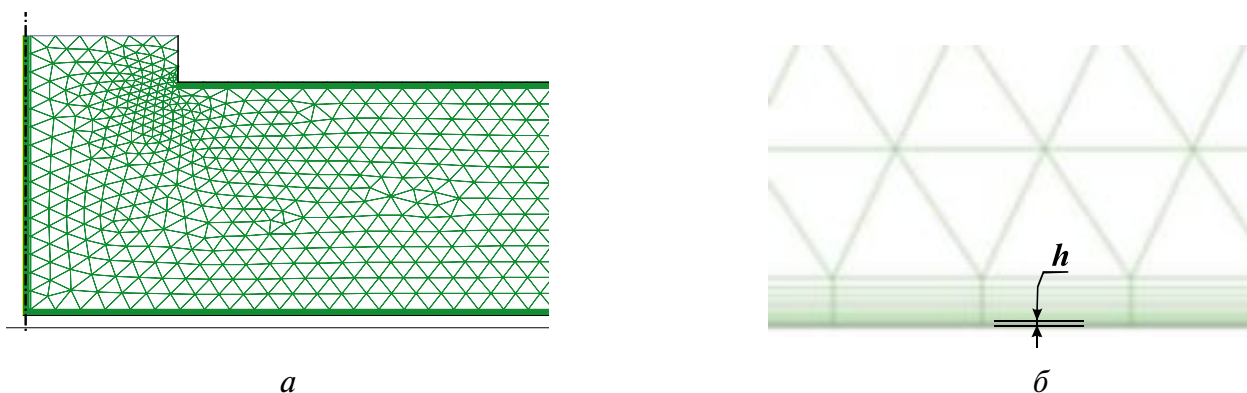


Рис. 2. Схема разностной расчетной сетки: а – участок входа в дисковый канал; б – пристенная область.

лезно используют, как правило, за счет применения утилизаторов. Повышение качества очистки сбросных газожидкостных сред позволяет не только уменьшить загрязнение окружающей среды, но и снизить потребление топлива за счет утилизации низкопотенциальной энергии газовых выбросов, а также сократить потери дорогостоящих материалов.

Представляется перспективным создание таких аэрозольных технологий, в которых энергопотенциал газовых выбросов полезно используется в процессах улавливания примесей. При этом ценные примеси возвращаются в технологическую цепочку, а опасные примеси направляются в системы нейтрализации. Одним из факторов, определяющих процессы улавливания или сепарации, является температурный режим потока аэрозоля. Расчет влияния перепада температур на улавливание высокодисперсных частиц в гладком канале необходим для создания новых высокоэффективных аэрозольных технологий.

В данной статье исследовано влияние перепада температур на процесс улавливания высокодисперсных частиц в цилиндрическом гладком кана-

ле. С этой целью разработана теплофизическая модель и выполнен расчет переноса высокодисперсных частиц в неизотермических условиях в гладком канале; определено влияние перепада температур на процесс улавливания высокодисперсных аэрозолей, что в дальнейшем позволит использовать полученные результаты для создания высокоэффективных газоочистных устройств.

Методы исследований

Для расчета применяли транспортное уравнение напряжений Рейнольдса и выражения для конвективного теплопереноса на основании уравнения энергии. Расчетную сетку канала строили в соответствии с геометрией (длина 0,2 м, высота 0,01 м, рис.1) рабочего участка экспериментального стенда с помощью треугольных сегментов. Для высокой точности расчетов треугольные сегменты имели площадь $S = 25 \cdot 10^{-8}$ м². Пристенный слой сетки смоделирован с помощью прямоугольных сегментов так, что высота каждого прямоугольника пропорционально уменьшается с приближением к стенке (рис.2).

Высота ближайшего к стенке слоя составляет $h = 0,005$ мм.

Оценка эффективности сепарирующих элементов сводится к расчету траектории транспортируемых потоком частиц и их взаимодействием с поверхностью осаждения. Частица считается уловленной, если траектория ее центра тяжести пересекается с обтекаемой поверхностью или касается ее. Был исследован диапазон температур от 30 до 100 °С и диапазон скоростей от 3 до 24 м/с. В процессе расчета исследовали изотермические условия. Для улучшения условий сходимости и точности расчетов использовали критерий сходимости 10^{-5} для переменных составляющих скорости, условия неразрывности, скорости диссипации и напряжений Рейнольдса, а для кинетической энергии турбулентности -10^{-8} . Также была исследована эффективность осаждения частиц в каналах с высотой $H = 5, 10, 15, 25, 30$ мм. Концентрация аэрозоля в потоке составляла $0,8...1$ г/м³.

В расчетах выбирали минимальный диаметр частиц $2 \cdot 10^{-6}$ м, максимальный $- 6 \cdot 10^{-6}$ м. Расход газовой среды определяли по формуле

$$G = \alpha_{\kappa} S_{\kappa} \sqrt{\frac{2}{\rho} g \Delta P}, \text{ а среднюю скорость потока}$$

рассчитывали по выражению $V_n = \frac{S_{\kappa}}{G}$, где

$\alpha_{\kappa} = 0,99$ – коэффициент расхода, S_{κ} – проходное сечение коллектора, м², ΔP – разность статического давления окружающей среды и статического давления в коллекторе, мм вод. ст., V_n – среднерасходная скорость потока.

Теплофизическая модель процесса

Используемая теплофизическая модель процессов переноса частиц в канале основана на транспортном уравнении напряжений Рейнольдса с расчетом индивидуальных напряжений $(\overline{u'_i u'_j})$ и имела вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = -D_{T,ij} + D_{L,ij} - G_{ij} - \varepsilon_{ij}. \quad (1)$$

Турбулентную диффузию $D_{T,ij}$ рассчитывали с помощью обобщенной модели диффузии

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right], \quad (2)$$

где μ_T – коэффициент турбулентной вязкости, $\sigma_T = 0,82$ – аналог числа Прандтля. Коэффициент турбулентной вязкости определяли по формуле

$$\mu_T = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где $C_{\mu} = 0,09$. Коэффициент молекулярной диффузии $D_{L,ij}$, рассчитывается по выражению

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu_L \frac{\partial \overline{(u'_i u'_j)}}{\partial x_k} \right]. \quad (4)$$

Генерация напряжений P и уровень диссипации кинетической энергии турбулентности ε рассчитывали по формулам:

$$G_{ij} = \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right), \quad (5)$$

$$\varepsilon = 2\mu_L \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}. \quad (6)$$

С учетом выражений (2-6) уравнение (1) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = & \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu_L \frac{\partial \overline{(u'_i u'_j)}}{\partial x_k} \right] - \rho \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] - \\ & - 2\mu_L \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}. \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{C_p \mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где E – полная энергия потока, τ – тензор напряжений, определяется из уравнения

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}, \quad (9)$$

где $\mu_{eff} = \mu_T + \mu_L$.

Условия турбулентной и ламинарной диффузии, генерации напряжений представляют транспортировку энергии за счет диффузии, теплопроводности и диссипации соответственно.

Для моделирования траекторий дисперсных частиц двухфазной среды решали уравнение движения, которое учитывало силу инерции частицы и другие основные силы, воздействующие на нее. В декартовых координатах это уравнение записывали следующим образом:

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i, \quad (10)$$

где F_D – сила сопротивления единицы массы частицы:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D}{24} Re, \quad (11)$$

$$Re = \rho d_p \frac{|u_p - u|}{\mu}, \quad (12)$$

F_i – дополнительные силы, воздействующие на частицу.

Коэффициент сопротивления

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + b_1 Re^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re}, \quad (13)$$

где b_i – полиномиально задаваемые коэффициенты.

Уравнение (10) учитывает дополнительные силы F_i , которые воздействуют на частицу. Для учета осаждения частиц под действием силы инер-

ции необходимо учитывать ускорение потока, обтекающего частицу. Сила инерции рассчитывалась следующим образом:

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p). \quad (14)$$

Дополнительная сила переноса частиц проявляется в случае возникновения перепада давления (диффузиофоретическая сила), которую можно рассчитать по формуле

$$F_2 = \left(\frac{P}{P_p} \right) u_p \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (15)$$

где P_p – давление потока у стенки; P – локальное давление потока.

В неизотермических условиях возникает сила термофореза

$$F_3 = -D_T \frac{1}{m_p T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (16)$$

где D_T – термофоретический коэффициент, который задается полиномиально.

Результаты исследований

Для исследования процессов улавливания частиц на поверхности осаждения использовался метод пакетного моделирования. С его помощью рассчитывалась траектория движения частиц и их осаждение на стенках канала. На рис. 3 представлены результаты расчетов коэффициента улавливания высокодисперсного аэрозоля в зависимости от высоты канала и перепада температур. Эффективность улавливания частиц аэрозоля стенками канала определялась по формуле

$$\eta_{\Sigma} = (1 - C_{вых}/C_{вх}).$$

Как видно из графика (рис. 3), при начальной скорости $V_0 = 5$ м/с для канала высотой $H = 5$ и 10 мм коэффициент улавливания при перепада температур $\Delta T = 80$ °С составляет 10 % и 9,5 % соответственно. При исследовании канала высотой $H = 5, 10$ мм без охлаждения ($\Delta T = 0$) коэффициент улавливания составил 4,8 %. При увеличении высоты канала эффект улавливания снижается.

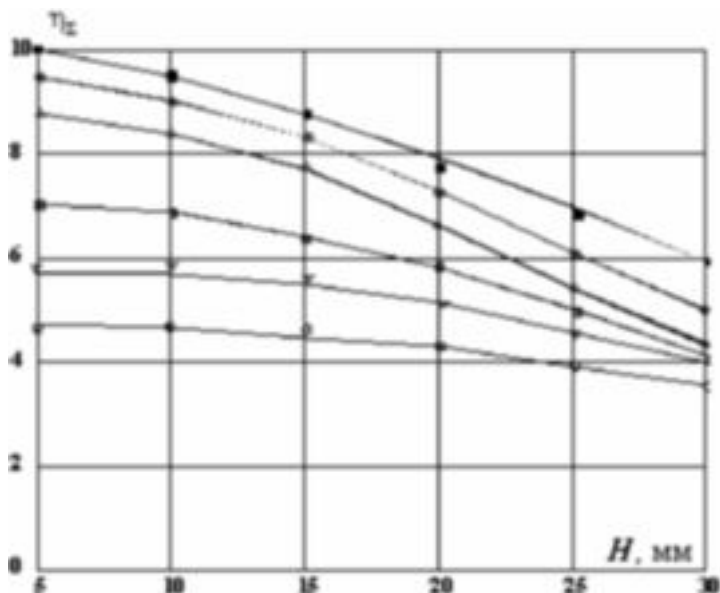


Рис. 3. Зависимость коэффициента улавливания высокодисперсного аэрозоля от высоты канала и перепада температур при начальной скорости $V_0=5$ м/с.: ■ – $\Delta T = 80^\circ\text{C}$, ● – 70, ▲ – 50, ■ – 30, ▼ – 20, ○ – 0 (без охлаждения).

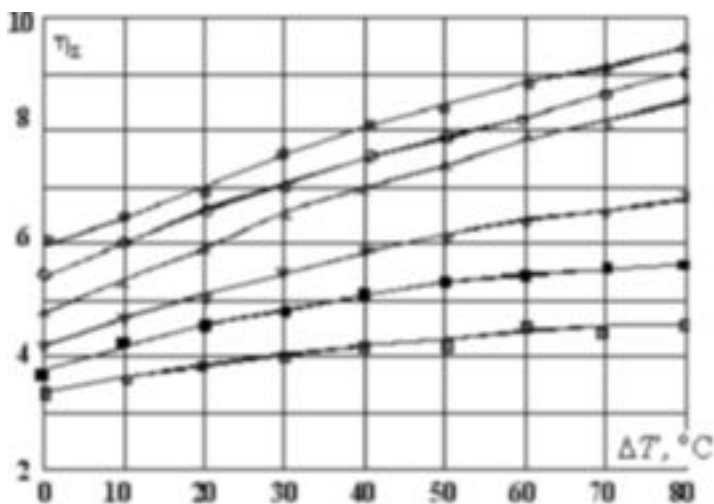


Рис. 4. Зависимость коэффициента улавливания от высоты канала и перепада температур в гладком канале при начальной скорости $V_0=5$ м/с: ● – высота канала $H = 5$ мм, ○ – 10, ▲ – 15, ▼ – 20, ■ – 25, ■ – 30.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента улавливания от высоты канала и перепада температур в гладком канале при различных скоростях. Как видно из графика, эффект термофореза

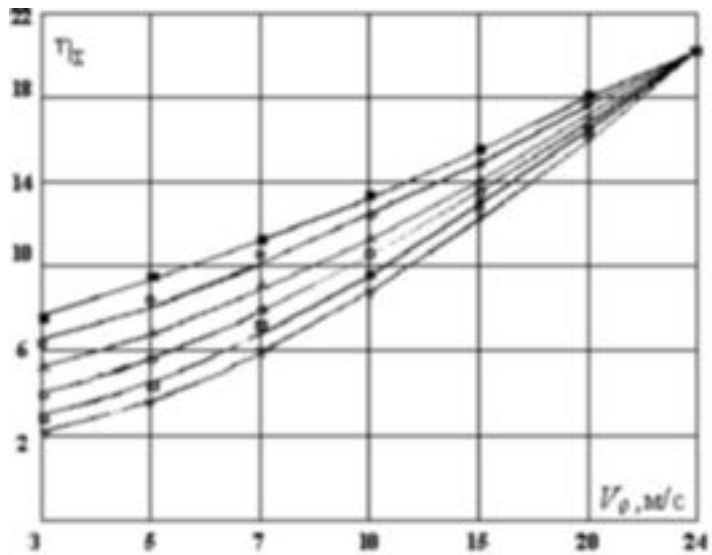


Рис. 5. Зависимость коэффициента улавливания от скорости и высоты канала при наличии перепада температур при $H = 10$ мм: ■ – $\Delta T = 80^\circ\text{C}$, ● – 70, ▲ – 50, ○ – 30, ■ – 20, ▼ – 0 (без охлаждения).

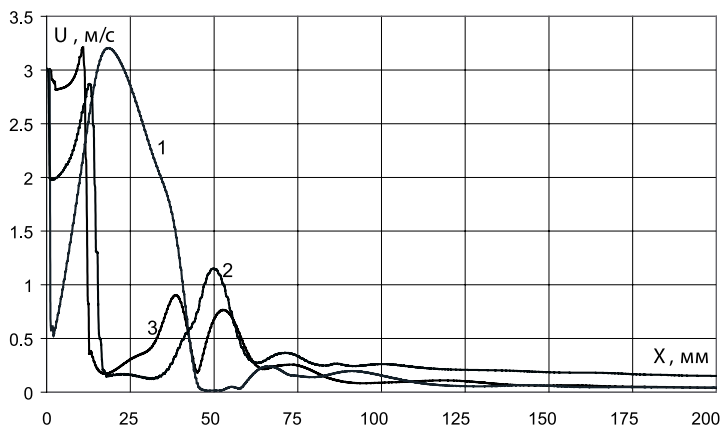


Рис. 6. Изменение скорости в канале при $V_0=3$ м/с и $H = 10$ мм: 1 – в центре канала, 2 – на расстоянии 9 мм, 3 – 1 мм от стенки (схема на рис. 1).

реза наибольший при малых скоростях в канале высотой $H = 5, 10$ мм.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента улавливания от скорости и высоты канала при наличии градиента температур. Так, при скорости $V_0 = 24$ м/с эффект осаждения в канале для $H = 5...30$ мм уменьшается от 22 до 20 % соответственно. Из результатов расчетов видно, что при больших скоростях происходит турбофоретическое осаждение, а интенсификация за счет термофореза неэффективна.

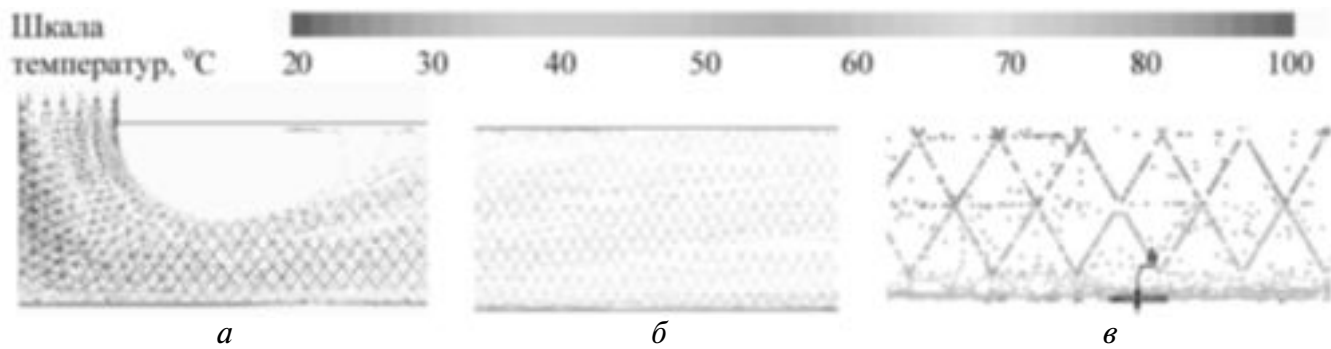


Рис. 7. Идентификация частиц по температуре в потоке в виде цветовой гаммы $V_0 = 3$ м/с: а – начало канала, б – центр канала, в – пристенный слой.

Был выполнен расчет скорости потока в цилиндрическом гладком канале при начальной скорости на входе $V_0 = 3$ м/с (рис. 6).

Для более детального исследования температурного поля потока частиц в канале исследовался пристенный слой, в котором собственно и происходит осаждение частиц. Как видно из рис.7, в пристенном слое температура частицы уменьшается до 45 °С. В канале создается перепад температур до $\Delta T = 60$ °С. В центре канала температура уменьшается от 100 до 75 °С.

Выводы

На основе созданной теплофизической модели выполнен расчет основных термодинамических характеристик дисперсной двухфазной среды для гладкого канала в неизотермических условиях. Результаты исследований показали, что осаждение высокодисперсных частиц на поверхности канала при наличии перепада температур происходит при совместном действии сил инерции, турбофореза и термофореза. В результате проведенных исследований подтверждена

неаддитивность влияния сил инерции и термофореза на осаждение высокодисперсных частиц.

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. Рыжков С.С., Харитонов Ю.М., Благодатный В.В. Методи очищення повітряного середовища від забруднень: Методичні вказівки./ Миколаїв: УДМТУ. – 2002. – 56 с.
3. 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.
4. Басок Б.И., Рыжков С.С. (мл). Термофоретическая очистка воздуха в энергетическом оборудовании. // Промышленная теплотехника. – 2003. – 25, № 5. – С. 45–50.

Получено 21.11.2005 г.