

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОСАЖДЕНИЯ ЖИДКИХ ЧАСТИЦ ЗА СЧЕТ ПОПЕРЕЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СЕТОК ГОФРИРОВАННОГО КОАГУЛЯТОРА

С. С. Рыжков, канд. техн. наук;
Н. А. Гончарова, студентка

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Исследовано влияние поперечных пульсаций сеток на характеристики дисперсного двухфазного потока в элементе гофрированного коагулятора. Показано, что пульсации воздействуют на гидродинамические характеристики потока в коагуляторе в диапазоне скоростей 1...20 м/с и влияют на концентрацию дисперсной фазы при прохождении коагулятора.

Ключевые слова: поперечные пульсации, гофрированный коагулятор, дисперсная фаза.

Анотація. Досліджено вплив поперечних пульсацій сіток на характеристики дисперсного двофазного потоку в елементі гофрованого коагулятора. Наведено, що поперечні пульсації впливають на гідродинамічні характеристики потоку в коагуляторі при діапазоні швидкостей 1...20 м/с і на концентрацію дисперсної фази при проходженні коагулятора.

Ключові слова: поперечні пульсації, гофрований коагулятор, дисперсна фаза.

Abstract. Influence of transversal pulsations of nets on descriptions of dispersible dysphasic stream in the element of the corrugated coagulator has been investigated. Transversal pulsations influence on hydrodynamic descriptions of stream in a coagulator at the range of velocity from 1 to 20 m/s and influence on the concentration of dispersible phase at passing of coagulator.

Keywords: crossed pulsations, corrugate coagulator, dispersed phase.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Разработка методов интенсификации переноса дисперсной фазы в элементах тепло-массообменного оборудования позволяет снизить его габариты и экономить энергетические и материальные ресурсы. Одним из методов повышения эффективности улавливания высокодисперсных частиц является использование сеточных гофрированных коагуляторов, которые достаточно изучены в изотермических [1, 3] и не изотермических [2] условиях. Создание поперечных пульсаций сеток позволяет интенсифицировать осаждение частиц за счет сил термофореза [6] и конденсировать пары веществ [5].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Аэрозольные выбросы технологических процессов отличаются многообразием происхождения, различным составом и параметрами. 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 путем создания дополнительных колебаний поверхностей осаждения. При этом ценные примеси возвращаются в технологическую цепочку, а опасные направляются в системы нейтрализации.

Одним из факторов, определяющих процессы улавливания или сепарации, является газодинамический режим потока аэрозоля. Расчет влияния пульсационных составляющих на улавливание высокодисперсных частиц в гладком канале необходим для создания новых высокоэффективных аэрозольных технологий.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование влияния поперечных пульсаций сеток гофрированного коагулятора на процесс улавливания высокодисперсных частиц при создании изотермических условий протекания дисперсной двухфазной среды.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Методы исследований. Для исследования гидродинамических характеристик дисперсной двухфазной среды в элементе сепарационного оборудования используется современный расчетный пакет FLUENT 6.3 (ANSYS, Inc) — универсальный программный комплекс, предназначенный для решения задач механики жидкостей и газов с использованием неструктурированной се-

точной технологии. Для двухфазных течений применяется модель дискретной фазы (DPM), для моделирования поперечных пульсаций сетки — модель Dynamic Mesh.

Для расчета газодинамики в элементе сепарационного оборудования (в треугольном канале) использовались теплофизическая модель напряжений Рейнольдса и модель движения частиц [4]. Верификация выбранной теплофизической модели осуществлена на основе сопоставления экспериментальных данных и расчетных значений, полученных при исследовании плоских и цилиндрических каналов истечения [1].

Расчетная сетка канала строилась с помощью треугольных сегментов площадью $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ (рис. 1).

Сеточный гофрированный коагулятор представляет собой элемент тонкой очистки от высокодисперсных аэрозолей очистных устройств [3]. Расчет сеток — треугольного элемента коагулятора — производился в двухмерной постановке задачи.

Результаты расчета для коагулятора представлены по аналогии с исследованиями цилиндрического и плоского каналов [1]. Входная температура дисперсной двухфазной среды принималась $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Входная концентрация дисперсной фазы (аэрозольных частиц) составляла 100 мг/м^3 , расчетный минимальный диаметр частиц $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, а максимальный $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Исследовался диапазон начальных скоростей от $1 \dots 20 \text{ м/с}$.

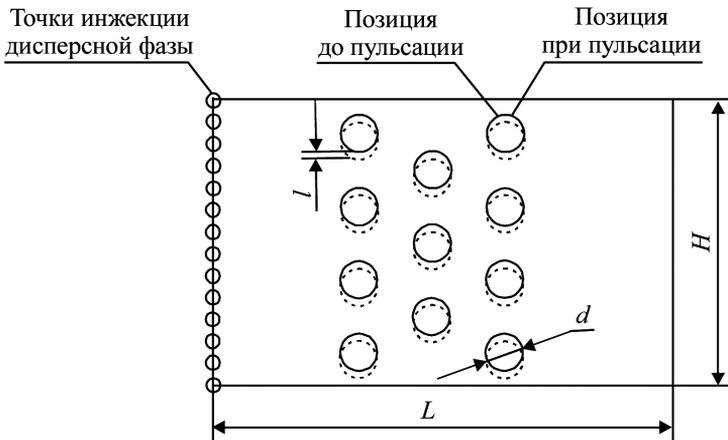


Рис. 1. Геометрия расчетного канала ($L = 6,3 \text{ мм}$, $H = 3,9 \text{ мм}$, $d = 0,5 \text{ мм}$, $l = 0,15 \text{ мм}$)

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 характеристик, а также процессов осаждения высокодисперсных частиц осуществлялся в нестационарных условиях с помощью разработанной геометрии в 2D построении с учетом пульсации сеток.

Математическая модель процесса.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_k}) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu_L \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] &- \rho \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \\ &- 2\mu \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k \partial x_k}, \end{aligned}$$

где u — скорость; u' — пульсационная составляющая скорости; x — координата; ρ — плотность; t — время; μ — вязкость; индексы: i, j, k — координаты и векторных величин; T — турбулентный; L — молекулярный.

Для моделирования траекторий дисперсных частиц двухфазной среды решалось уравнение движения [4], которое учитывало силу инерции частицы и другие основные силы, воздействующие на нее. В декартовых координатах это уравнение записывалось следующим образом:

$$\frac{du_p}{dx_k} = F_D + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i,$$

где F_D — сила сопротивления для единицы массы частицы:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D}{24} \text{Re}; \text{Re} = \rho d_p \frac{|u_p - u|}{\mu},$$

где F_i — дополнительные силы, воздействующие на частицу.

Коэффициент сопротивления C_D рассчитывался следующим образом:

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

где b_i — полиномиально задаваемые коэффициенты.

Уравнение учитывает дополнительные силы F_i , которые воздействуют на частицу. Для учета осаждения частиц под действием силы инерции необходимо учитывать ускорение потока, обтекающего частицу. Сила инерции рассчитывается по формуле

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

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 выражению

$$F_2 = -\frac{1}{2} m_k \frac{\partial \overline{u_k'^2}}{\partial y}.$$

Дополнительная сила переноса частиц появляется в случае возникновения перепада давления и называется диффузиофоретической силой, которую можно рассчитать по формуле

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

где P — давление; P_w — давление у стенки.

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

Гармонический закон изменения поступательной скорости по оси y описывается уравнением

$$u_y = \cos \left(\frac{1}{2} t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Максимальное значение перемещения сетки по оси y равно $0,15$ мм при $\tau = 0,6$.

Результаты исследований. В процессе исследований были получены следующие результаты: наличие поперечных пульсаций сеток незначительно влияет на гидродинамические характеристики потока — распределение скорости, кинетической энергии турбуленции.

При прохождении двухфазным потоком сеток коагулятора наблюдается повышение значений его скорости — в среднем при $U_0 = 5$ м/с до 10 м/с (рис. 2), при $U_0 = 20$ м/с до

44 м/с (рис. 3). Наличие вихреобразований после сеток позволяет интенсифицировать осаждение высокодисперсных частиц. Получены также распределения турбулентности (рис. 4, 5). В результате расчета были получены значения коэффициента улавливания высокодисперсных частиц (см. таблицу и рис. 6).

Наличие поперечных пульсаций сеток интенсифицирует процесс осаждения частиц и увеличивает значения коэффициента улавливания — в среднем при $U_0 = 1$ м/с от 5 до $5,88\%$, а при $U_0 = 20$ м/с от $42,5$ до $46,5\%$.

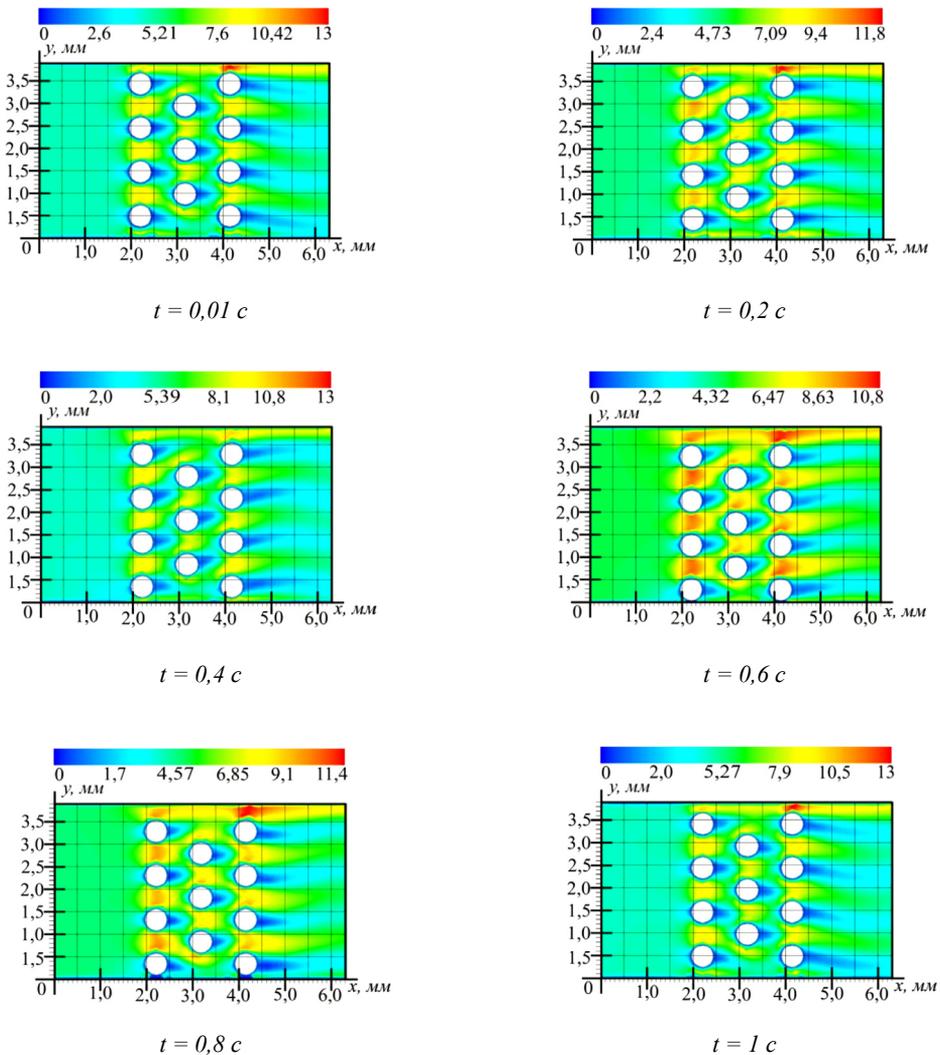


Рис. 2. Распределение скорости в элементе сеточного гофрированного коагулятора при поперечных пульсациях при $U_0 = 5$ м/с

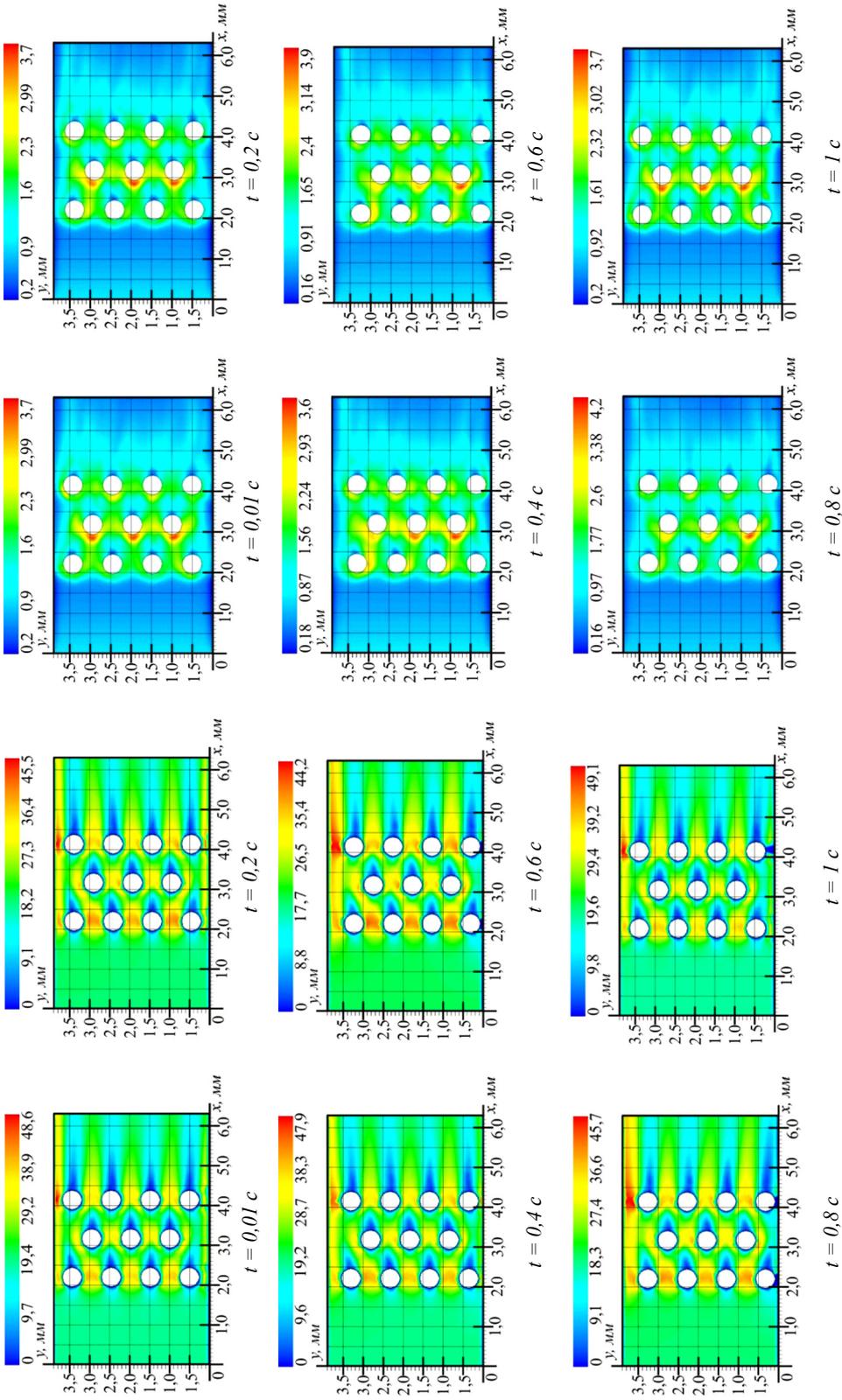


Рис. 3. Распределение скорости в элементе сеточного гофрированного коагулятора при поперечных пульсациях при $U_0 = 20\text{ м/с}$

Рис. 4. Распределение кинетической энергии турбулентности в элементе сеточного гофрированного коагулятора при поперечных пульсациях при $U_0 = 5\text{ м/с}$

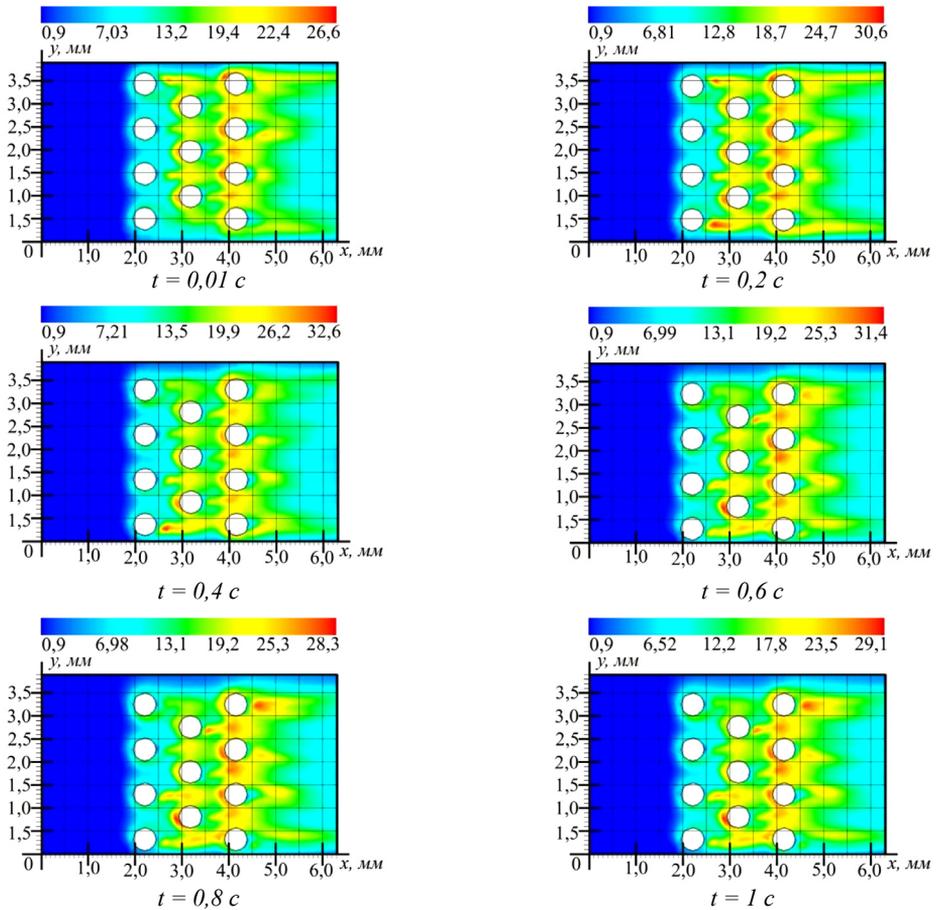


Рис. 5. Распределение кинетической энергии турбулентности в элементе сеточного гофрированного коагулятора при поперечных пульсациях при $U_0 = 20$ м/с

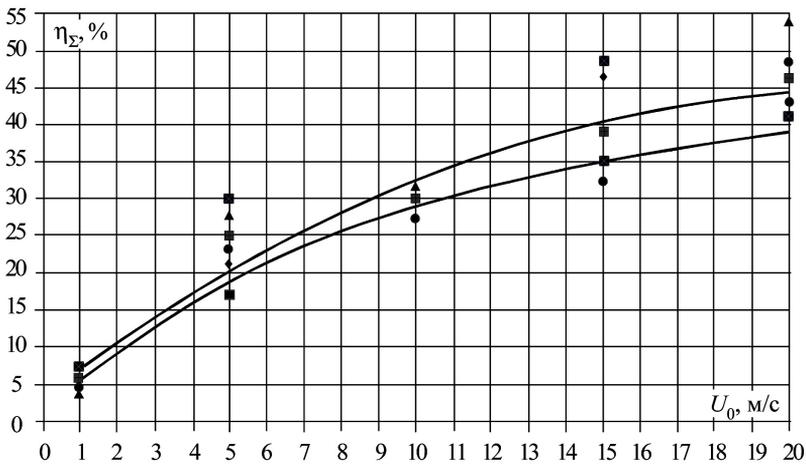


Рис. 6. Зависимость коэффициента улавливания от начальной скорости потока при поперечных пульсациях сеток гофрированного коагулятора: $\blacklozenge, \blacktriangle, \blacksquare, \boxtimes$ — с пульсациями; \bullet — без пульсаций

Начальная скорость U_0 , м/с	Значения коэффициента улавливания при поперечных пульсациях					Среднее значение	Значения коэффициента улавливания без пульсаций
	%						
1	5,60	5,60	4,40	6,90	6,90	5,88	5
5	21,25	17,5	27,5	30,0	28,75	25	22,5
10	31,25	27,5	31,25	30,0	30,0	30	27,5
15	47,50	35,0	35,0	48,75	31,0	39,45	32,5
20	48,75	42,5	53,75	41,25	46,25	46,5	42,5

ВЫВОДЫ

1. При расчете дисперсных газовых потоков в изотермических условиях применена адаптированная математическая модель.
 2. Проведенные исследования показали влияния поперечных пульсаций на гидродинамические характеристики потока в коагуляторе при

диапазоне скоростей от 1 до 20 м/с и на концентрацию дисперсной фазы при прохождении коагулятора. 3. Использование пульсаций сеток гофрированного коагулятора позволяет увеличить значения коэффициента улавливания высокодисперсных частиц по сравнению с режимами течения без пульсаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 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.
- [2] Басок Б.И., Рыжков С.С., Гончарова Н.А. Осаждение жидких частиц газового потока в треугольных каналах под действием градиента температур // Промышленная теплотехника. — 2008. — № 6. — С. 23–28.
- [3] Рыжков С.С., Басок Б.И. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред // Промышленная теплотехника. — 2001. — Т. 23, № 4–5. — С. 141–145.
- [4] Ounis H., Ahmadi G., McLaughlin J.B. Brownian Diffusion of Submicrometer Particles in the Viscous Sublayer // Journal of Colloid and Interface Science. — 1991. — 143 (1). — P. 266–277.
- [5] 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.
- [6] Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer / L. Talbot et al. // J. Fluid Mech. — 1980. — Vol. 101 (4). — P. 737–758.