

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕПАРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

С. С. Рыжков, канд. техн. наук;
С. Ю. Пастухов, магистрант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Выполнено моделирование осаждения высокодисперсных жидких частиц в элементе сепарационного оборудования. Изучена зависимость гидродинамических характеристик потока, а также суммарного коэффициента осаждения жидких частиц от геометрических характеристик элемента в диапазоне начальных скоростей 15...30 м/с для частиц диаметром 10^{-6} ... 10^{-5} м.

Ключевые слова: численное моделирование, газоочистка, сепарация, дисперсная фаза, фильтрация.

Анотація. Виконано моделювання осадження високодисперсних рідких частинок в елементі сепараційного обладнання. Досліджено залежність гідродинамічних характеристик потоку та сумарного коефіцієнта осадження рідких частинок у діапазоні вхідних швидкостей 15...30 м/с для частинок діаметром 10^{-6} ... 10^{-5} м.

Ключові слова: числове моделювання, газоочистка, сепарація, дисперсна фаза, фільтрація.

Abstract. The simulation of the fine-grained fluid particles deposition at the element of the separation equipment is performed. The dependence of the hydrodynamic stream characteristics and cumulative rate of the fine-grained fluid particles deposition from the geometric characteristics of the element in such range of speed as 15...30 mph for the particles with diameter 10^{-6} ... 10^{-5} m is explored.

Keywords: digital modeling, gas-cleaning, separation, disperse phase, filtration.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Разработка методов интенсификации переноса дисперсной фазы в элементах сепарационного оборудования позволяет снизить его габариты и экономить энергетические и материальные ресурсы. Одним из методов повышения эффективности улавливания высокодисперсных частиц является совершенствование существующих конструкций, в частности оптимизация геометрии их проточной части. Повышение качества очистки сбросных газожидкостных сред позволяет не только уменьшить загрязнение окружающей

среды, но и снизить потребление энергоносителей, а также сократить потери дорогостоящих материалов. Совершенствование существующего сепарационного оборудования представляется крайне важной задачей. Одним из методов ее решения является поиск оптимальных геометрических соотношений конструкции проточной части. Подобная оптимизация предполагает получение и обработку большого количества экспериментальных данных, большую часть которых в современных условиях можно получить средствами численного моделирования.

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕРЕШЕННЫХ РАНЕЕ ЧАСТЕЙ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ

В данной статье исследовано влияние геометрических характеристик проточной части элемента сепарационного оборудования на процесс улавливания высоко-дисперсных частиц в элементах газоочистителей. Выполнено исследование гидродинамических характеристик дисперсных двухфазных потоков, а также проанализированы значения коэффициента улавливания частиц диаметром $10^{-6} \dots 10^{-5}$ м в диапазоне скоростей входа 15...30 м/с. В дальнейшем полученные результаты могут быть использованы для совершенствования конструкции проточной части газоочистных устройств.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является оптимизация проточной части элемента сепарационного оборудования путем сравнительного анализа моделей с различными значениями конструктивного параметра h , представляющего собой кратчайшее расстояние между внутренней обечайкой элемента и его наружной стенкой, измеренное в плоскости симметрии, а также выявление оптималь-

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu_L \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left[\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] - 2\mu_L \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}.$$

Для моделирования траекторий дисперсных частиц двухфазной среды решалось уравнение движения [2], которое учитывало силу инерции частицы и другие основные силы, воздействующие на нее. В декартовых координатах это уравнение записывалось следующим образом:

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

где F_D — сила сопротивления для единицы массы частицы; F_i — дополнительные силы, действующие на частицу.

Исходная геометрия элемента грубой очистки фильтра системы суфлирования газотурбинного двигателя представлена в работе [6].

ных значений данного параметра, отличных от базового.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

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

Расчет динамики вязкого газа осуществляется с помощью основного уравнения Навье–Стокса и уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_n} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_n} + \frac{\partial u_i u_k}{\partial x_k}; \quad \frac{\partial u_n}{\partial x_k} = 0.$$

Для расчета пульсационных характеристик газового потока использовалась RSM модель турбулентности (Reynolds Stress Model), верификация которой для решения подобных задач осуществлена в работах [1–5]. Транспортное уравнение напряжений Рейнольдса RSM модели имеет вид

На основе исходной геометрии (рис. 1) был построен ряд двумерных моделей, отличающихся значением конструктивного параметра h . Данный параметр представляет собой кратчайшее расстояние между внутренней обечайкой элемента и его наружной стенкой, измеренное в плоскости симметрии. Для базовой конструкции значение данного параметра составляет $h = 15$ мм.

В рамках серии численных экспериментов рассматривались также вариативные модели со значением $h = 2; 4; 7,5; 12; 22,5$ мм. Конфигурация наружной стенки, входной перфорации и выходной решетки элемента оставалась неизменной.

На основе полученных геометрических моделей были построены конечно-объемные

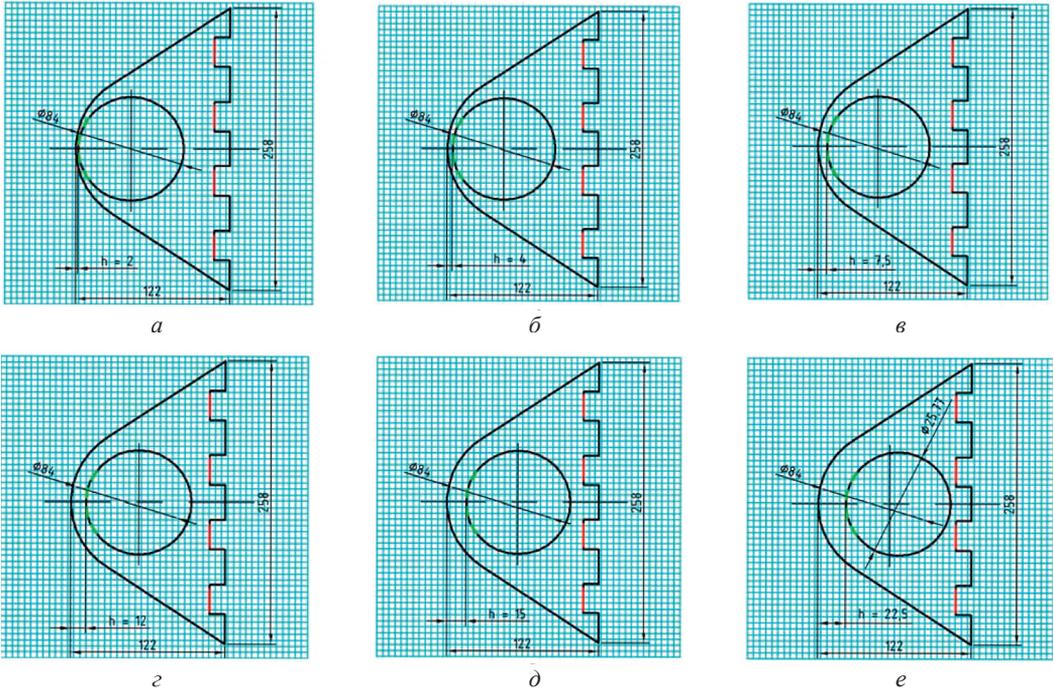


Рис. 1. Исходная геометрия рабочей области для заданных значений h : a — 2 мм; $б$ — 4 мм; $в$ — 7,5 мм; $г$ — 12 мм; $д$ — 15 мм; $е$ — 22,5 мм

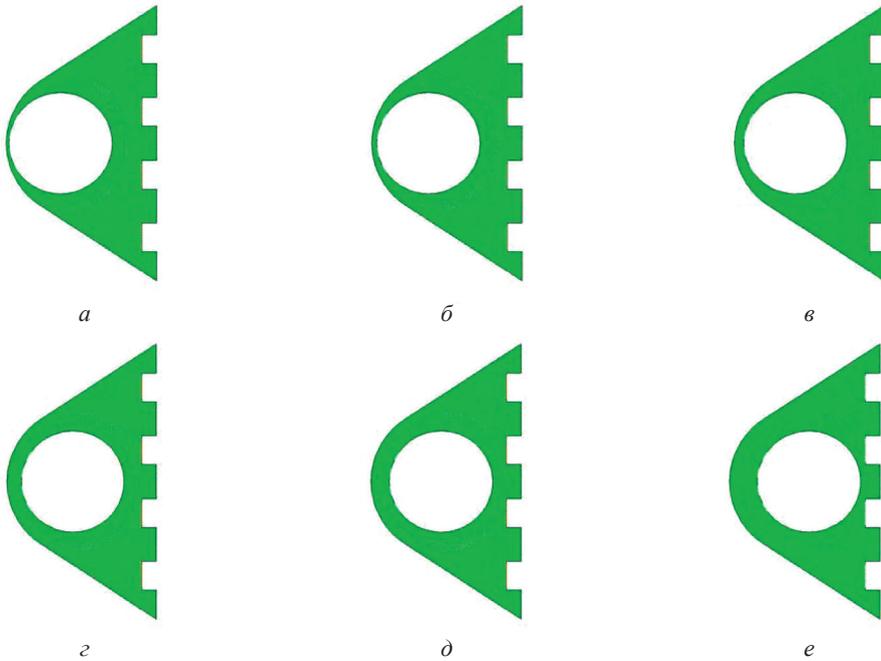


Рис. 2. Общий вид расчетной сетки для заданных значений параметра h : a — 2 мм; $б$ — 4 мм; $в$ — 7,5 мм; $г$ — 12 мм; $д$ — 15 мм; $е$ — 22,5 мм

расчетные сетки из треугольных сегментов средней площадью $S = 1,125 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Общий вид расчетных сеток представлен на рис. 2.

Входная концентрация дисперсной фазы (аэрозольных частиц) была принята равной 100 мг/м^3 , диапазон расчетных диаметров частиц — $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, диапазон начальных скоростей потока — $15 \dots 30 \text{ м/с}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате выполнения серии численных экспериментов был выявлен характер влияния конструктивного параметра h на поле скоростей и давлений на двухфазную полидисперсную среду. Поскольку выявленные изменения полей на исследуемом интервале скоростей оказались в значительной степени подобными, их анализ можно провести на примере одного скоростного режима. На рис. 3 и 4 отражен характер изменения полей скоростей и давлений в зависимости от конструктивного параметра h для скорости входа $v = 30 \text{ м/с}$.

Как видим, с уменьшением значения h увеличиваются размеры парных вихревых зон, расположенных между внутренней обечайкой и выходной решеткой. Эти зоны

характеризуются низким значением модуля скорости и значительной потерей кинетической энергии потока на вихреобразование. В свою очередь, области высоких скоростей с уменьшением параметра h перестают быть ярко выраженными и смещаются к наружным стенкам.

Увеличение размера вихревых зон приводит к преобладанию областей низкого давления, что хорошо видно на рис. 4. Разрастание парных вихрей вызывает значительную интенсификацию осаждения высокодисперсных частиц, однако оно же приводит к значительному росту газодинамического сопротивления. График зависимости газодинамического сопротивления от входной скорости потока представлен на рис. 5. Кривые сопротивления имеют вид полиномов второй степени, что хорошо соотносится с реальной физической картиной процесса. Согласно техническому заданию сопротивление элемента не должно превышать 4 кПа при разработке рекомендаций по оптимальной геометрии.

Как видно из рис. 5, газодинамическое сопротивление не накладывает ограничений на использование моделей со значением конструктивного параметра $h = 7,5; 12; 22,5 \text{ мм}$,

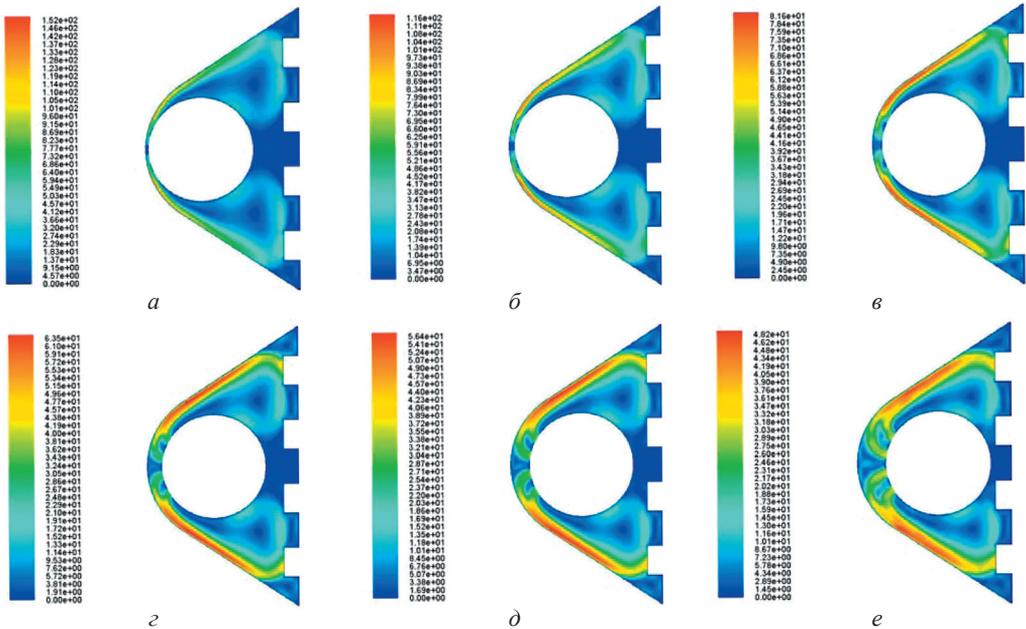


Рис. 3. Распределение модуля скорости в расчетной области при $v = 30 \text{ м/с}$ для значений h : а — 2 мм; б — 4 мм; в — 7,5 мм; г — 12 мм; д — 15 мм; е — 22,5 мм

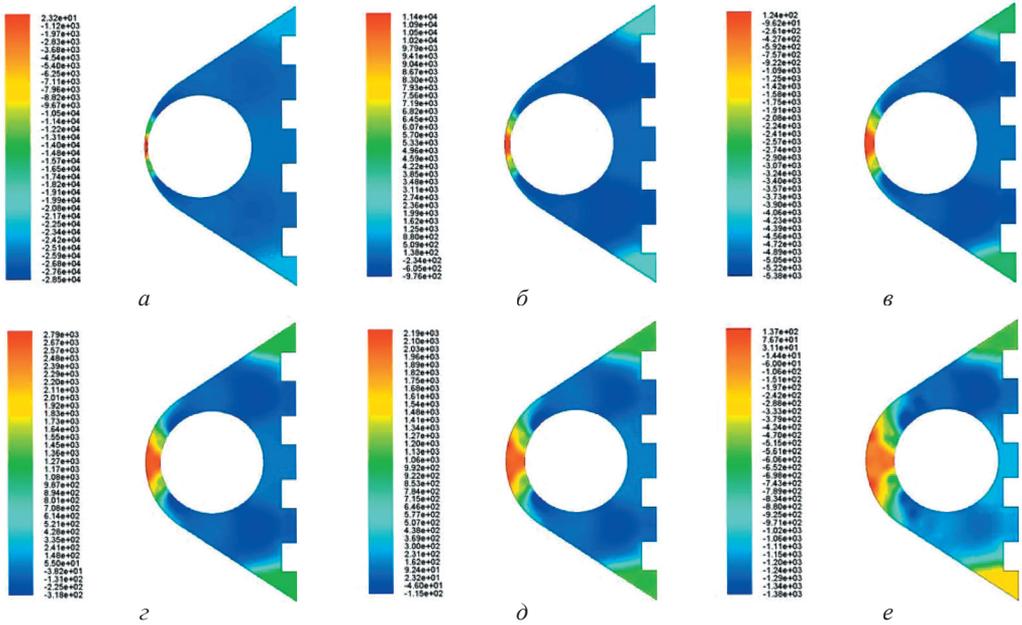


Рис. 4. Распределение статического давления в расчетной области при $v = 30$ м/с для значений h : а — 2 мм; б — 4 мм; в — 7,5 мм; г — 12 мм; д — 15 мм; е — 22,5 мм

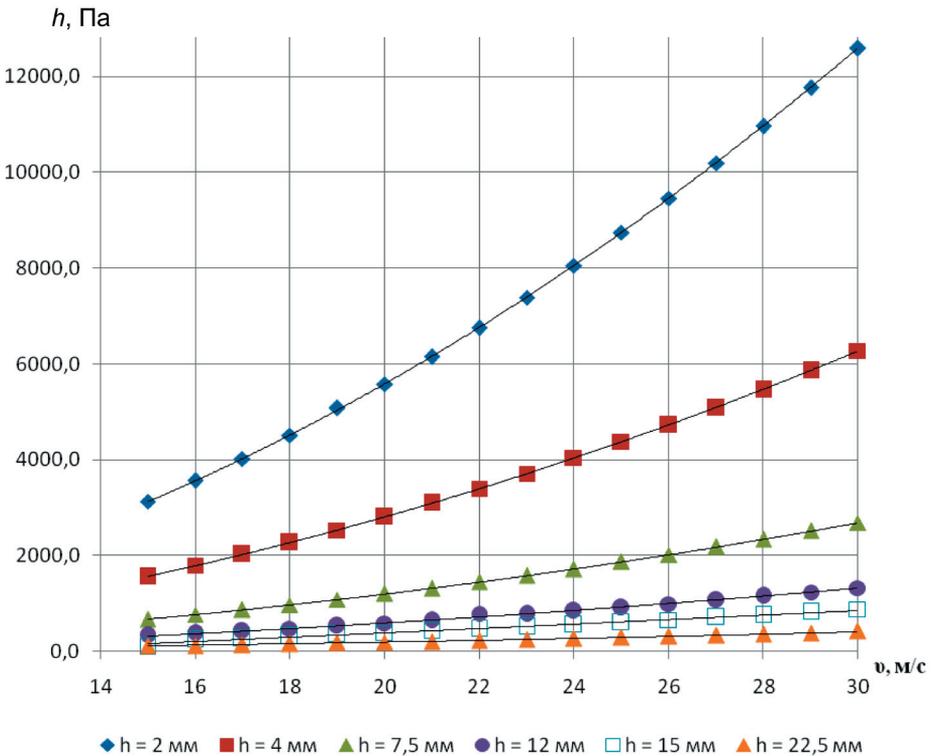


Рис. 5. Распределение газодинамического сопротивления элемента в зависимости от входной скорости потока и конструктивного параметра h , Па

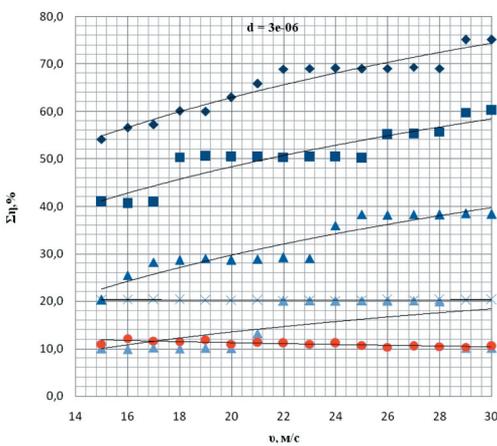
в то время как модель с $h = 4$ мм неприменима для скоростей свыше 24 м/с, а использованные модели с $h = 2$ мм вообще нежелательно, так как возможно лишь в узком интервале входных скоростей (15...17 м/с).

Графики зависимости суммарного коэффициента улавливания частиц различной дисперсности от входной скорости потока и конструктивного параметра h представлены на рис. 6. Уменьшение его значения по сравнению с базовым позволяет на 15...40 % повысить суммарный коэффициент улавливания частиц диаметром $1 \cdot 10^{-6}$... $7 \cdot 10^{-6}$ на

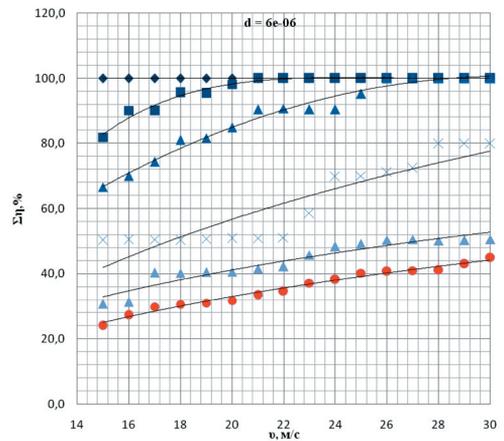
всем диапазоне входных скоростей. В то же время для частиц диаметром $7 \cdot 10^{-6}$... $1 \cdot 10^{-5}$ и выше влияние конструктивного параметра h на суммарный коэффициент улавливания незначительно.

Следовательно, для оптимизации геометрии проточного канала элемента грубой очистки рекомендуется снижать значение конструктивного параметра h до пределов, установленных ограничениями по газодинамическому сопротивлению элемента.

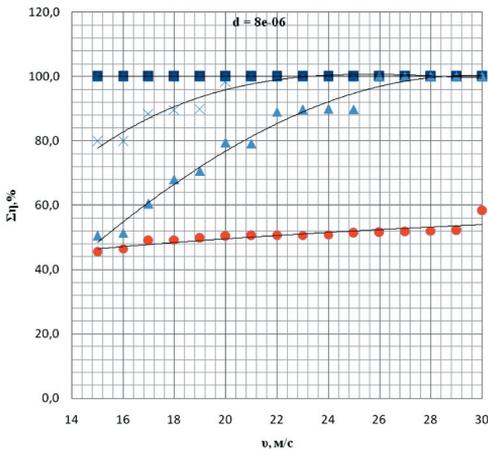
По результатам численного эксперимента оптимальной можно полагать расчетную



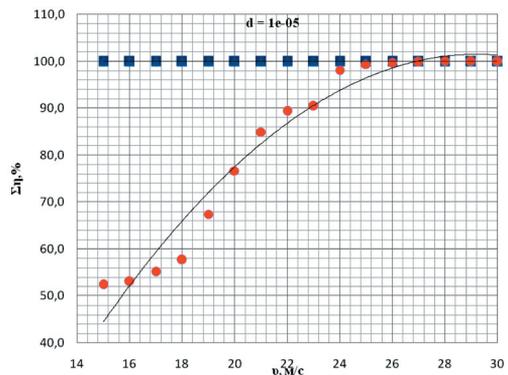
a



б



в



з

◆ $h = 2,0$ мм ■ $h = 4$ мм ▲ $h = 7,5$ мм × $h = 12,0$ мм ▲ $h = 15,0$ мм ● $h = 22,5$ мм

Рис. 6. Распределение суммарного коэффициента улавливания в зависимости от входной скорости потока и конструктивного параметра h для частиц различной дисперсности: *a* — $d = 3e-06$ м; *б* — $d = 6e-06$ м; *в* — $d = 8e-06$ м; *з* — $d = 1e-05$ м

модель с $h = 7,5$ мм, так как она дает наибольший прирост суммарного коэффициента улавливания среди моделей, использование которых не ограничено указанным выше признаком.

С уменьшением конструктивного параметра h суммарный коэффициент улавливания частиц диаметром $1 \cdot 10^{-6} \dots 7 \cdot 10^{-6}$ возрастает во всем рассматриваемом диапазоне скоростей. Однако сопутствующий рост газодинамического сопротивления элемента ограничивает возможность использования моделей со значением h менее 7,5 мм. Таким образом, это значение конструктивного параметра можно считать оптимальным для данной геометрии.

ВЫВОД

В результате сравнительного анализа моделей с различными значениями конструктивного параметра h , представляющего собой кратчайшее расстояние между внутренней обечайкой элемента и его наружной стенкой, измеренное в плоскости симметрии, было установлено, что оптимальным значением данного параметра является $h \approx 7,5$ мм, поскольку в диапазоне начальных скоростей 15...30 м/с для частиц диаметром $10^{-6} \dots 10^{-5}$ м оно дает наибольший суммарный коэффициент улавливания при допустимых значениях гидродинамического сопротивления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Ounis, H.* Brownian Diffusion of Submicrometer Particles in the Viscous Sublayer [Text] / H. Ounis, G. Ahmadi, J. B. McLaughlin // *Journal of Colloid and Interface Science*, — 1991. — 143 (1). — P. 266–277. (для уравнения движения – для нахождения силы сопротивления для единицы массы частицы).
- [2] *Ryzhkov, S. S.* Jet-contact separator of exhaust gases of ship engines [Text] / S. S. Ryzhkov // *Proceedings of the third international conference on marine industry*. — Varna, Bulgaria, 2001. — Nr. 2. — P. 137–145.
- [3] *Басок, Б. И.* Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале [Текст] / Б. И. Басок, С. С. Рыжков // *Промышленная теплотехника*. — 2006. — № 3. — С. 141–145.
- [4] *Басок, Б. И.* Экспериментальная установка для исследования процессов утилизации дисперсных частиц в двухфазном потоке [Текст] / Б. И. Басок, С. С. Рыжков // *Промышленная теплотехника*. — 2006. — № 4.
- [5] *Рыжков, С. С.* Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред [Текст] / С. С. Рыжков, Б. И. Басок // *Промышленная теплотехника*. — 2001, № 4–5.
- [6] *Рыжков, С. С.* Применение RSM модели для исследования газодинамики 3D элемента сепарационного оборудования [Текст] / С. С. Рыжков, С. Ю. Пастухов // *Зб. наук. праць НУК*. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 2 (425). — С. 170–176.