

1. Состояние вопроса, актуальность В химической промышленности и смежных с ней отраслях производства используются газоочистные аппараты с закрученным движением дисперсной среды, эффективность которых полностью определяется гидродинамическим совершенствованием процесса сепарации. Из современных газоочистных аппаратов наиболее распространены циклоны, скрубберы, вихревые аппараты. Как правило, эти аппараты отличаются способом организации закрученного потока и устройством узла разделения фаз. Основными недостатками известных устройств являются: низкая эффективность улавливания тонкодисперсных частиц, вторичный унос дисперсной фазы, высокое гидравлическое сопротивление, склонность к залипанию пыли. Указанные недостатки ставят задачу поиска новых оригинальных конструктивно-схемных и технологических решений на основе перехода к современным газопромывателям нового поколения, в которых низкие энергетические затраты на газоочистку, эксплуатационная надежность и простота конструктивного оформления, сочетаются с высокой эффективностью процесса сепарации дисперсных частиц. Несмотря на сравнительно большое число исследований в этой области, практически отсутствуют работы, охватывающие принципы расчета газоочистного оборудования с единых методологических позиций. В настоящее время произошли значительные изменения в области математического моделирования, связанные с применением вычислительных технологий и пакетов программ, что позволяет прогнозировать аэрогидродинамические характеристики аппаратов еще на стадии разработки и проектирования. Цели данной работы: 1. Выполнить моделирование процесса очистки газа от дисперсных примесей и создать на его основе методику и алгоритм для прогнозирования эффективности процесса сепарации и аэрогидродинамических характеристик. 2. Спланировать и провести численный эксперимент. 3. На основе численных данных эксперимента построить функциональные зависимости, описывающие процесс очистки газовых выбросов.

2. Моделирование движения газодисперсных потоков Основными механизмами осаждения частиц пыли в газопромывателе являются: осаждение под действием центробежных сил, инерционное соударение, перехват и диффузионное осаждение [1]. Для описания гидродинамики используется физико-математическая модель, которая включает: уравнения Навье - Стокса, осредненные по Рейнольдсу, и уравнения неразрывности; (1) где u_z - скорость потока вдоль оси; u_r - скорость потока в радиальном направлении; u_θ - тангенциальная скорость потока; ρ - плотность смеси; μ - коэффициент турбулентной вязкости; P - давление; \vec{u} - вектор скорости. Для замыкания системы уравнений используется двухпараметрическая модель турбулентности $k - \epsilon$ [8], для неё решаются два дополнительных уравнения переноса с целью определения k - турбулентной кинетической энергии и ϵ турбулентной энергии диссипации. Модель турбулентности: (2) где k_s - турбулентная кинетическая

энергия газовой фазы; σ_k - турбулентное число Прандтля для уравнения кинетической энергии; μ_s и $\mu_t C$ - молекулярная и турбулентная вязкость газовой фазы; ϵ_s - скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; σ_ϵ - турбулентное число Прандтля; t_{ij} - декартовы компоненты тензора напряжений: $C_\mu = 0,09$; $C_{\epsilon 1} = 1,44$; $C_{\epsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$. Решение математической модели выполнялось в пакете вычислительной гидродинамики Ansys CFX. Полагается, что на боковых стенках выполняется условие прилипания $U_{wall} = 0$. Задача решалась в осесимметричной постановке, течение предполагалось турбулентным. В численных экспериментах оценивалось влияние интенсивности закрутки потока на структуру течения, число Рейнольдса варьировалось от $1 \cdot 10^2$ до $60 \cdot 10^4$. Результаты численного расчета распределения составляющих скоростей по сечению аппарата представлены на рис. 1. Рис. 1 - Проекция тангенциальных, осевых и радиальных скоростей $Re = 6 \cdot 10^4$. Качественно выделяются следующие три типа течения: слоистое течение, течение с приосевым вихрем, течение с приосевым и пристенным присоединенными вихрями. При значительной интенсивности процесса, $Re = 6 \cdot 10^4$, у образующей возникают большие тангенциальные скорости, это приводит к значительным градиентам давления, вызывающим обратное течение вдоль оси. При увеличении числа Рейнольдса структура течения изменяется от слоистого до усложненного развитыми вторичными вихрями.

3. Численный эксперимент и определение фактора сепарации. Для расчета движения частиц в закрученном потоке была составлена математическая модель процесса сепарации дисперсных частиц на капли орошающей жидкости. Учитывались следующие силы, действующие на частицу: сила тяжести, сила Кориолиса, сила аэродинамического сопротивления среды и центробежная сила [5, 6]. Система уравнений движения частицы может быть записана в виде: (3) Аналогично записывается система уравнений движения капель жидкости: (4) Из системы уравнений движения частицы следует, что её траектория зависит от следующих факторов: d_c - диаметра частиц (капель d_k); ρ_c - плотности частицы (жидкости ρ_j); μ_g - динамической вязкости газа (жидкости μ_j); r - радиуса (характерного размера) аппарата; U_0 - начальной тангенциальной скорости газа, а также от геометрии завихрителя α , \check{D} , \check{z} . Формальный анализ зависимостей (4) показывает, что строгое соблюдение подобия движения в геометрически подобных аппаратах требует сохранения следующих безразмерных параметров: d_c/D_0 ; ρ_c/ρ_g ; $Re = v_c d_c / \nu_g$; $Sh = \omega D_0 / \nu_r$. Если ввести параметр аппарата R_z , характеризующий геометрию аппарата в рассматриваемой точке траектории, то систему дифференциальных уравнений (4) можно переписать: (5) Заменяем реальные величины безразмерными: , Структура зависимости (5) показывает целесообразность введения двух комплексов, один из которых характеризует влияние режима течения и диаметра частиц, а другой: $C_g = R_z^2 / S$, является геометрической характеристикой аппарата и учитывает переменную площадь

сечения его проточной части. Решение системы (5) при начальных условиях: - для цилиндрических координат, и - для определения скорости, позволяет построить траектории движения частиц (рис. 2). Рис. 2 - Траектории движения частиц различного диаметра При рассмотрении движения частиц в газопромывателе встает вопрос об исходе её движения: вынесет ли газовый поток частицу в выхлопную трубу, или же под действием сил инерции она отлетит к стенкам аппарата и отсепарируется. При $C_p = C_g$ траектория частицы будет одинаковой, следовательно, C_p и C_g являются критериями подобия движения частиц. Для определения влияния критериев подобия на пылеулавливание был проведен численный эксперимент для двух геометрически подобных газопромывателей, выявляющий соотношение между C_p и C_g , при котором происходит оседание частиц на стенку аппарата. Методом последовательных приближений значений C_p и C_g при различных начальных условиях, была составлена регрессионная модель для оценки влияния на вторичный унос пыли критериев C_g и C_p . Зависимость адекватно описывается степенной функцией, что представлено на рис.3, где линия регрессии описывается формулой $y=0.482x^{0.615}$. Рис. 3 - Критическая траектория движения частиц Аналогичным образом был исследован ряд геометрически подобных аппаратов других авторов, при этом, независимо от начальных условий, выражение $C_p \approx f(C_g)$ аппроксимируется степенной функцией: $C_p \approx \Phi \cdot C_g^{0,6}$ (6) Для определения величины Φ (фактора сепарации) были спланированы и проведены численные эксперименты, позволившие выявить зависимость Φ от входной скорости газодисперсного потока (z_1), угла наклона лопастей завихрителя (z_2), расхода орошающей жидкости (z_3), координаты ввода дисперсных частиц (z_4). Искомая зависимость хорошо описывается полиномом второй степени: (7) Таблица 1 - Параметры плана эксперимента

z_1 (м/с)	z_2 (°)	z_3 (м ³ /с)	z_4 (м)
0	20	30	6
3	6	3	3

Основной уровень, Z_j 0 20 30 6 3 Интервал варьирования, DZ_j 2 10 1 0,5÷5,5 В табл. 1 z_1, z_2, z_3 и z_4 - натуральные переменные, соответствующие безразмерным переменным x_1, x_2, x_3 и x_4 ; Z_j 0-основной уровень, DZ_j - интервал варьирования, Данные таблицы 1 были приведены к форме, используемой при постановке математико-статистических исследований, также была составлена матрица планирования, в соответствии с которой поставлен эксперимент. Количество опытов принималось равным 250. Исключая незначимые коэффициенты, для которых t- критерий Стьюдента меньше табулированного, получено адекватное уравнение регрессии в безразмерном виде: (8) Проверка значимости уравнения (8) показала, что оно адекватно описывает процесс сепарации и дает качественно верное представление о характере влияния основных параметров на траекторию движения частиц. Уравнение (8) позволяет рассчитать безразмерный фактор сепарации Φ и прогнозировать эффективность газоочистки. Результаты расчета представлены в виде графических зависимостей на рис. 4 и 5. Рис. 4 -

Зависимость фактора сепарации Φ от координаты ввода дисперсных частиц и удельного орошения Рис. 5 - Зависимость фактора сепарации Φ от скорости газодисперсного потока и наклона лопастей завихрителя 4. Расчет эффективности газоочистки

Определение эффективности газоочистки сводится к определению эффективного диаметра частиц $d_{эф}$, полностью улавливаемых аппаратом. С учетом принятых ранее соотношений (6) получено выражение для определения эффективного диаметра частиц $d_{эф}$. (9) Вероятность сепарации частиц заданного дисперсного состава выражается величиной коэффициента очистки η . Характеристики дисперсного состава пыли талька представлены на рис. 6. Эффективность очистки с учетом содержания частиц диаметром $d \leq d_{эф}$ ($N_{эф}$) определяется по формуле: $\eta = (100 - N_{эф}) / 100$. Важно отметить, что эффективный диаметр частиц значительно меньше их медианного диаметра, обычно вводимого в расчет, что и обуславливает неточность известных зависимостей. Введение эффективного диаметра частиц позволило значительно сблизить экспериментальные и расчетные данные. Ошибка прогноза эффективности очистки находится в пределах $\delta_i = (0,5...+4,5) \%$. Рис. 6 - Содержание частиц диаметром $d \leq d_{эф}$

Выводы 1. Разработана аналитическая модель течения газодисперсной среды, позволяющая рассчитать распределения всех компонент скорости U'_ϕ, U'_r, U'_x , а также функции тока $\psi(r, z)$ и построить характерную гидродинамическую картину течения в программном комплексе Ansys CFX. 2. Установлена однозначность влияния на вторичный унос пыли критериев геометрического подобия S_g и S_p , определяющих конструктивные и режимные параметры аппарата. Введено понятие "фактор сепарации Φ ", связывающий оба критерия и позволяющий разделить процесс газоочистки на две области: вторичного уноса пыли и зоны полной сепарации. 3. Результаты исследований положены в основу нового метода расчета эффективности газоочистки, отличающегося хорошей точностью прогнозируемых значений, простотой получаемых на его основе решений, а также возможностью оценки эффективности газоочистки при отсутствии сведений о дисперсном составе пыли.