

На правах рукописи

РГБ ОД

28 ИЮН 2009

БЕЗИК Дмитрий Александрович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛОНА
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ**

Специальность 05.13.16 – Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях (промышленность)

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Брянск 2000

Работа выполнена в Брянской государственной инженерно-технологической академии

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор *Тайц О. Г.*

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор *Погорелов Д. Ю.*

кандидат технических наук, доцент *Капустин Р. П.*

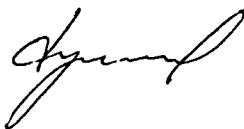
Ведущая организация АО «Брянский завод силикатного кирпича».

Защита состоится 1 июня 2000 года в 16 часов на заседании специализированного совета К063.28.03 Брянского государственного технического университета по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7, Брянский государственный технический университет, ауд. 220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Брянского государственного технического университета.

Автореферат разослан 26 апреля 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, профессор



В. К. Гулаков

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы: Защита воздушного бассейна от выбросов промышленных предприятий и энергетических объектов является одной из важнейших проблем современной экологии. Среди вредных выбросов химической, деревообрабатывающей промышленности, цементного, силикатного производства и многих других имеется большая доля в виде пыли, золы и сажи. За один год промышленными предприятиями мира выбрасывается в атмосферу около 580 млн. т различной пыли. Это наносит существенный урон здоровью людей и окружающей среде.

Для очистки газов от пыли применяются пылесадительные камеры, сухие и мокрые циклоны, механические и электрические фильтры и др.

Широкое применение для пылеулавливания получили циклоны. Это вызвано наличием у них ряда достоинств: простотой изготовления и небольшой стоимостью; высокой эксплуатационной надёжностью; сохранением требуемого уровня эффективности очистки с ростом концентрации твёрдой фазы.

В связи с ужесточением требований к пылеулавливанию, актуальной становится задача оптимального выбора режимов эксплуатации существующих циклонов и разработки новых моделей циклонов, адаптированных к конкретным условиям работы. Однако в настоящее время недостаточно разработаны методики прогнозирования параметров произвольных циклонов. В связи с этим, важное значение приобретают теоретические методы исследования с использованием средств современной вычислительной техники.

Значительная часть работ при создании и реконструкции предприятий приходится на проектирование. Ускорение и снижение стоимости этого процесса достигается применением САПР. Это приводит к необходимости разработки методики автоматизированного расчёта параметров циклонов, а также методики их выбора для систем пылеочистки предприятий.

Цель и задачи работы: автоматизация многофакторного расчёта параметров циклона на основе функциональных зависимостей, получаемых путём математического моделирования процесса пылеулавливания.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Построить математическую модель пылеулавливания в циклоне.
2. Спланировать и провести численный эксперимент.
3. На основе численных данных эксперимента построить функциональные зависимости, описывающие процесс пылеулавливания.
4. Используя полученные зависимости, разработать объектно-ориентированную САПР по расчету параметров циклонов.

Объект исследования: процесс пылеулавливания в циклоне.

Методы исследования: математическое моделирование, программирование, планирование эксперимента, использование теории подобия и различных численных методов (решение краевых задач и систем обыкновенных дифференциальных уравнений, аппроксимация функций и др.).

Научная новизна. Исходя из совместного решения дифференциаль-

ных уравнений математической модели, описывающих траектории частиц в газовом потоке, получена функциональная зависимость, определяющая условие осаждения частиц пыли и связывающая наиболее существенные факторы. На её основе получены формулы для расчёта основных технических характеристик циклона и разработана методика их автоматизированного расчёта. Разработана объектно-ориентированная САПР для расчёта параметров циклонов и их выбора для систем пылеочистки предприятий.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением расчетных данных с известными экспериментальными данными по исследованию циклонных аппаратов; сопоставлением полученных зависимостей с результатами других авторов.

Практическая значимость диссертационной работы. Полученные в работе зависимости позволяют прогнозировать основные эксплуатационные параметры произвольных циклонов. Разработанное программное обеспечение автоматизирует этот процесс и позволяет производить выбор циклонов (из базы данных) и режим их работы для систем пылеочистки предприятий.

Апробация работы, публикации. Основные положения работы были доложены на вузовских научно-технических конференциях Брянской государственной сельскохозяйственной академии и Брянской государственной инженерно-технологической академии в 1997-1999 г., а также на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии на рубеже третьего тысячелетия и пути их решения» (Брянск 1999 г). По теме работы опубликовано 7 статей.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель центробежного осаждения частиц пыли в циклоне в виде системы дифференциальных уравнений.
2. Методика и результаты численного эксперимента по изучению траекторий частиц в циклоне.
3. Представление результатов численного эксперимента в функциональной форме, учитывающей взаимодействие двенадцати существенных факторов.
4. Зависимости для определения технических характеристик циклонов.
5. Объектно-ориентированную САПР по расчёту циклонов.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав текста, заключения, списка литературы и шести приложений. Работа изложена на 121 страницах текста, содержит 36 рисунков и 6 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы.

В первой главе рассматривается постановка задачи центробежного пылеулавливания в циклоне; проводится анализ существующих расчетных формул и методик по расчету циклонов; анализируются известные экспериментальные и теоретические результаты по изучению зависимости эффективности улавливания пыли циклонами от их конструктивных параметров, режима эксплуатации и свойств пылегазового потока.

Суть работы циклонного аппарата сводится к следующему. Запылённый поток вводится в циклон таким образом, чтобы придать ему вращательное движение (см. рис. 1). Под действием сил инерции частицы пыли отбрасываются к стенкам циклона и сползают по винтовым траекториям в бункер для накопления пыли. Газ, очищенный от пыли, продолжая вращаться, разворачивается и выходит в выхлопную трубу.

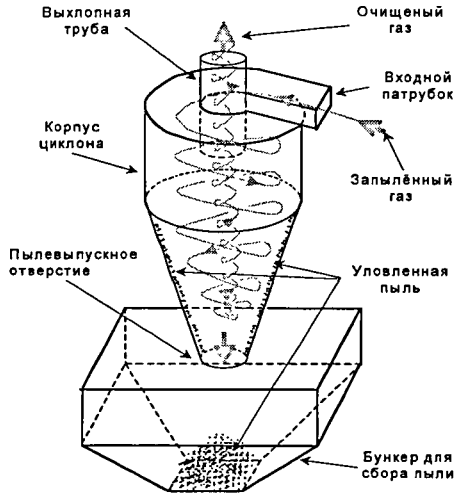


Рис. 1. Схема циклона

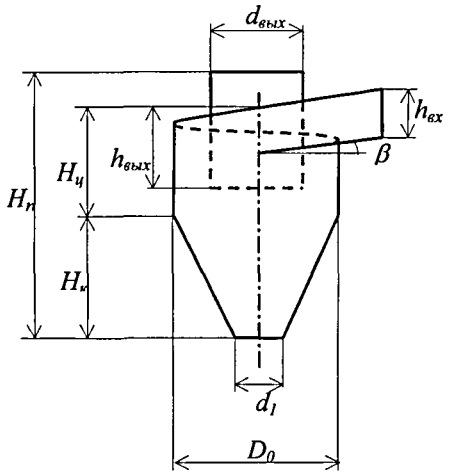


Рис. 2. Геометрические параметры циклона

Основными техническими характеристиками циклона являются: диаметр улавливаемых частиц (d_{50} - улавливаемых с вероятностью 50 %; d_{xp} - улавливаемых с вероятностью 100 %), коэффициент очистки η_n и коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta_{пн}$.

Отмечено, что, несмотря на большой опыт эксплуатации и разработки циклонов, а также большое количество экспериментальных и теоретических исследований, существующие методики расчета не позволяют точно прогнозировать параметры произвольного циклона при его проектировании.

Несмотря на простоту конструкции и принципа работы циклона, при расчёте его параметров возникают существенные трудности. Это обусловлено тем, что эффективность его работы зависит от большого количества взаимосвязанных факторов и эффектов. В связи со сложностью экспериментального изучения пылеулавливания в циклоне, большое значение приобретают теоретические методы.

Во второй главе рассматривается физическая постановка задачи и формулируется математическая модель процесса центробежного пылеулавливания в циклоне; производится выбор расчетных схем решения уравнений

математической модели; обсуждается вопрос реализации этих схем на ПЭВМ; на основе уравнений модели и выбранных методов их решения строится расчётная программа по изучению движения отдельных частиц, служащая инструментом для исследования пылеулавливания в циклоне.

Математическая модель описывает траектории отдельных частиц пыли в циклоне. Основной вопрос, который возникает при рассмотрении движения частиц - вопрос об исходе их полёта, то есть, вынесет ли газовый поток частицу в выхлопную трубу, или же под действием сил инерции она отбросится к стенкам циклона и сползёт в бункер. Расчёт траекторий частиц в циклоне позволяет определить его технические характеристики. Эта задача представляет собой задачу теоретической механики и аэрогидромеханики.

В математической модели приняты следующие допущения:

1. Газ считается идеальной и несжимаемой жидкостью, следовательно, течение газов потенциально.
2. Поток осесимметричен и стационарен.
3. Частица считается шаром малого диаметра d_v , а сила сопротивления вычисляется по формуле Стокса.
4. Плотность частиц значительно превышает плотность газа ($\rho_v \gg \rho_g$).
5. Концентрация пыли мала, взаимодействие частиц не учитывается.
6. Частица, достигшая боковой стенки циклона, считается уловленной.

Исходя из данных литературы по пылеулавливанию в циклонах и анализа процесса пылеулавливания, выделены наиболее существенные факторы, влияющие на пылеулавливание:

1. Физические параметры пыли и газа: ρ_v - плотность частиц, μ_g - динамическая вязкость газа, d_v - диаметр частиц.
2. Геометрические параметры циклона (см. рис. 2): R_0 - радиус циклона, H_v - высота цилиндрической части корпуса циклона, H_k - высота конической части корпуса циклона, $d_{\text{вых}}$ - диаметр выхлопной трубы циклона, $h_{\text{вых}}$ - величина заглубления выхлопной трубы в циклон, $h_{\text{вх}}$ - высота входа, $f_{\text{вх}}$ - площадь входного патрубка, β - угол ввода потока в циклон.
3. Режим эксплуатации циклона: Q_0 - расход.

Основными силами, действующими на частицы, являются силы инерции и сила сопротивления со стороны газа. Уравнения движения частицы, в проекциях на оси цилиндрической системы координат, имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{dU_v}{dt} = \frac{18\mu_g}{\rho_v d_v^2} (U_g - U_v) - \frac{U_v V_v}{r_v} \\ \frac{dV_v}{dt} = \frac{18\mu_g}{\rho_v d_v^2} (V_g - V_v) + \frac{U_v^2}{r_v} \\ \frac{dW_v}{dt} = \frac{18\mu_g}{\rho_v d_v^2} (W_g - W_v) \end{cases}, \quad (1)$$

где U_g, V_g, W_g - тангенциальная, радиальная и осевая скорости газа;
 U_v, V_v, W_v - то же для частицы.

Для нахождения траектории по уравнению (1) необходимо знать поле скоростей газового потока (т. е. U_z, V_z, W_z).

Для определения поля скоростей газа используется метод наложения потенциальных потоков. Газовый поток представляется в виде наложения двух:

- I - осесимметричного потока в циклоне от входного патрубка к выхлопной трубе без вращения (см. рис. 3);
- II - вращательного потока вокруг оси симметрии циклона.

Радиальная V_z и аксиальная W_z скорости газового потока определяются потоком I, а тангенциальная U_z - потоком II.

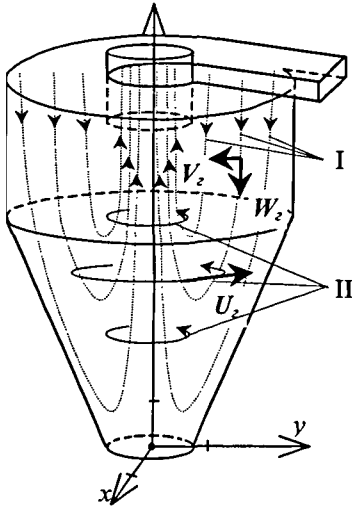


Рис. 3. Представление движения газов в виде наложения двух потенциальных потоков

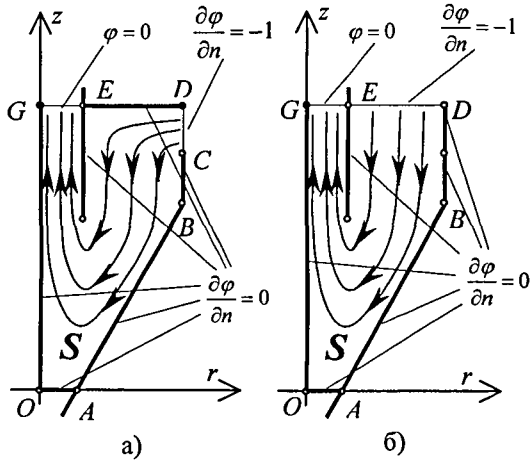


Рис. 4. Граничные условия для уравнения Лапласа (изображена половина вертикального сечения циклона): а) улиточный ввод; б) винтовой ввод

Задача определения скоростей потенциального потока I сводится к решению смешанной задачи для уравнения Лапласа. Граничные условия определяются в зависимости от вида ввода (см. рис. 4). В цилиндрических координатах эта задача запишется так:

$$\begin{cases} \varphi_{rr}'' + \varphi_{zz}'' + \varphi_r' / r = 0; & (r, z) \in S \\ \varphi|_{GE} = 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{OA, AB, BC, CD, DE, EF, FG, GO} = 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{ED \rightarrow DC} = v_{ex} \end{cases}, \quad (2)$$

где S - область для отыскания решения уравнения Лапласа, v_{ex} - входная скорость потока.

Решение смешанной задачи для уравнения Лапласа (2) позволяет определить радиальную и аксиальную скорости газового потока:

$$V_z = \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad W_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (3)$$

Потенциальный поток Π определяет тангенциальную скорость газов:

$$U_z = \frac{R_0}{r} \cdot U_{z_0}. \quad (4)$$

В безразмерных переменных (обозначены штрихом)

$r' = r/R_0$, $z' = z/R_0$, $U' = R_0^2 \cdot U/Q_0$, $V' = R_0^2 \cdot V/Q_0$, $W' = R_0^2 \cdot W/Q_0$, $t' = Q_0 t/R_0^3$, система уравнений движения (1) имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dU'_i}{dt'} = 18K_t \left(\frac{K_v}{r'_v} - U'_i \right) - \frac{U'_i V'_v}{r'_v} \\ \frac{dV'_v}{dt'} = 18K_t (V'_z(r'_v, z'_v, \dots) - V'_v) + \frac{U'^2_v}{r'_v} \\ \frac{dW'_v}{dt'} = 18K_t (W'_z(r'_v, z'_v, \dots) - W'_v) \end{cases}, \quad (5)$$

где

$$K_t = \frac{\mu_z R_0^3}{\rho_v Q_0 d_v^2}, \quad K_v = \frac{\cos \beta}{f'_{ex}} \quad (6)$$

- критерии подобия для движения частицы пыли в циклоне.

Уравнения (2), (3), (4) и (5) составляют математическую модель пылеулавливания в циклоне. Вместе с критериями подобия (6) и заданными начальными условиями они определяют траекторию движения частицы.

Все уравнения математической модели решались численно на ПЭВМ.

Решение уравнения Лапласа (2) находилось методом конечных разностей (МКР). Для его решения вводилась сетка

$$\Omega = \{y_{ij} = (r_i, z_j); r_i = ih; z_j = jh\}_{i,j=0}^{N,J_{\max}}.$$

Уравнение Лапласа аппроксимировалось со вторым порядком точности по h конечно-разностным уравнением

$$\frac{i+1/2}{h} \cdot \varphi_{i+1,j} + \frac{i}{h} \cdot \varphi_{i,j+1} - \frac{4 \cdot i}{h} \cdot \varphi_{i,j} + \frac{i-1/2}{h} \cdot \varphi_{i-1,j} + \frac{i}{h} \cdot \varphi_{i,j-1} = 0, \quad (7)$$

а в граничных точках – в соответствии с граничными условиями. Из-за наличия третьего слагаемого в уравнении (2), получаемая в МКР система линейных конечно-разностных уравнений получается плохо обусловленной (число обусловленности около 10^5). В расчётах использовался метод верхней релаксации с постепенным уменьшением шага разбиения. В операторном виде его можно представить так:

$$\begin{aligned} A_1 \varphi^{n+1} + A_2 \varphi^n + D \left(\frac{1}{\omega} \varphi^{n+1} + \left(1 - \frac{1}{\omega} \right) \varphi^n \right) &= 0, \\ (D\varphi)_y^n &= \frac{4 \cdot i}{h} \varphi_y, \quad (A_1 \varphi)_y^n = \frac{i+1/2}{h} \varphi_{i+1,j} + \frac{i}{h} \varphi_{i,j+1}, \quad (A_2 \varphi)_y^n = \frac{i-1/2}{h} \varphi_{i-1,j} + \frac{i}{h} \varphi_{i,j-1} \end{aligned} \quad (8)$$

(ω - оптимизационный параметр; верхний индекс показывает номер итерации). В первом приближении берется относительно большой шаг, который с ростом числа итераций уменьшается.

Ошибка, допущенная при решении задачи (2), интегрируется при расчёте траектории частицы по уравнению (5), поэтому важно обеспечить высокую точность его решения. Этим обусловлено большое количество итераций (около 10^4), выбор малого шага сетки и большое количество независимых в системе конечно-разностных уравнений (порядок системы около 15000).

Для интегрирования уравнений движения (5) используется полуявный метод Эйлера с автоматическим выбором шага интегрирования. Разностный аналог (5) при интегрировании полуявным методом Эйлера имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U^{n+1} = U^n + 18K_1(K_v/r^n - U^{n+1})\Delta t - U^{n+1}V^n\Delta t/r^n \\ V^{n+1} = V^n + 18K_1(V_z(r^n, z^n) - V^{n+1})\Delta t + (U^n)^2\Delta t/r^n \\ W^{n+1} = W^n + 18K_1(W_z(r^n, z^n) - W^{n+1})\Delta t \\ r^{n+1} = r^n + V^{n+1}\Delta t \\ z^{n+1} = z^n + W^{n+1}\Delta t \\ \varphi^{n+1} = \varphi^n + U^{n+1}\Delta t/r^n \\ \Delta t^{n+1} = C/\sqrt{(V_z^n)^2 + (W_z^n)^2} \end{array} \right. , \quad (9)$$

где x^n - значение переменной на n шаге интегрирования.

В соответствии с уравнениями математической модели и выбранными методами их решения, был составлен алгоритм построения траекторий частиц пыли в циклоне и написана соответствующая программа. Вначале программа определяет поле скоростей газового потока путём решения смешанной задачи для уравнения Лапласа (2). Затем строятся траектории частиц путём интегрирования уравнений движения частицы (5). Программа позволяет изучать траектории движения отдельных частиц в зависимости от значений критериев подобия и геометрической формы циклона.

В третьей главе описываются проведённые численные эксперименты и анализируются полученные результаты. На основе данных численного эксперимента строится зависимость между критериями подобия, связывающая 12 основных факторов, влияющих на пылеулавливание. На её основе выводятся формулы для расчёта основных технических характеристик циклона.

Траектории частиц при движении в геометрически подобных циклонах определяются критериями подобия K_i и K_v . На рис. 5 показаны проекции траекторий частиц на плоскость $\varphi=0$ при различных значениях K_i и фиксированном K_v . Расчёты показали, что при каждом фиксированном значении K_v существует некоторое критическое значение $K_{i,кр}$, которое разделяет все значения K_i на две части – при $K_i < K_{i,кр}$ частица оседает на стенке, а при $K_i > K_{i,кр}$ частица уносится потоком воздуха в выхлопную трубу.

Была проведена серия численных экспериментов, в которых, изменяя значение K_v , методом последовательных приближений находилось значение

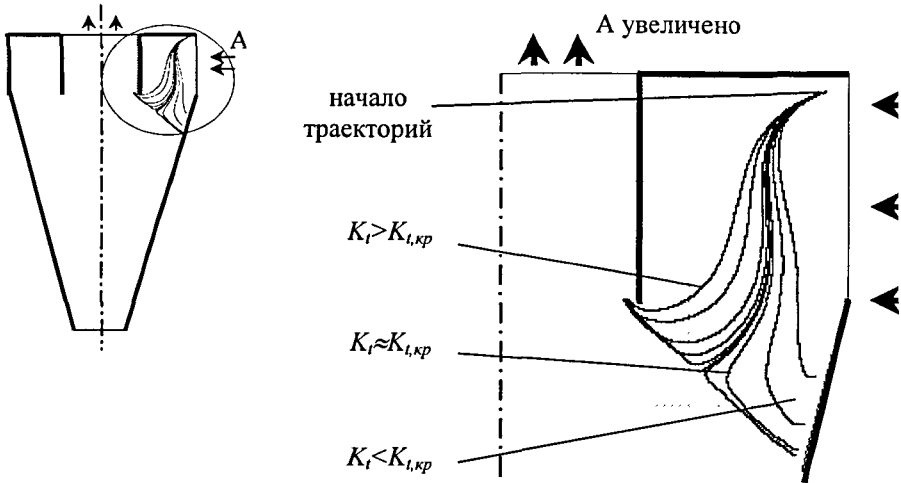


Рис. 5. Проекция траекторий частиц в циклоне на плоскость $\varphi=0$. ($K_v=const$; изображено вертикальное сечение циклона)

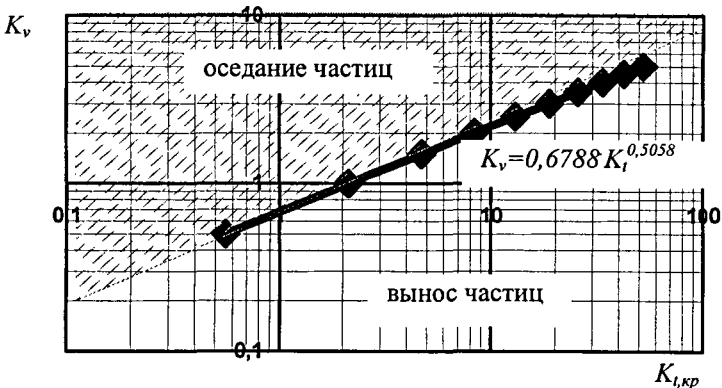


Рис. 6. Зависимость между критериями подобия, разделяющая эффекты «оседания частицы» и «выноса её в выхлопную трубу» (циклон ЦН-11)

$K_{t,кр}$ разграничивающее исходы «оседание» и «снос в трубу» (см. рис. 6). Связь между критериями подобия, разделяющая исходы оседания частиц на стенках циклона и выноса их в выхлопную трубу не зависит от типа циклона и начальных условий движения частиц и аппроксимируется функцией

$$K_v = a \cdot \sqrt{K_{t,кр}}. \quad (10)$$

Безразмерный коэффициент a определяется геометрической формой циклона (он зависит от вида функций W'_z и V'_z) и начальными условиями движе-

ния частицы. Он определяет диаметр улавливаемых частиц и его можно назвать критерием геометрического подобия циклонов.

Функция (10) определяет связь между перечисленными выше факторами, и разграничивает исходы улавливания и сноса частиц в выхлопную трубу.

Результаты расчёта показывают, что начальные условия для скорости частиц практически не влияют на величину a . В то же время её начальные координаты оказывают существенное влияние. Причем, a можно представить в виде произведения двух функций:

$$a = f(r'_{ч0}; z'_{ч0}) \cdot a_{кр}(r'_{вых}; h'_{вых}; \dots) \quad (11)$$

где $a_{кр}$ – безразмерная функция геометрических параметров циклона;

f – функция, учитывающая влияние начальных координат частицы.

В зависимости от вида ввода потока в циклон возможны два случая распределения начальных точек траекторий частиц. Но это практически не влияет на вид зависимости a от положения начальной точки. На рис. 7 показаны графики зависимости коэффициента a от относительной координаты \tilde{x} , которая принимает значение «0» в самом неблагоприятном для осаждения частицы случае, и «1» - в самом благоприятном. Смысл переменной \tilde{x} ясен из рисунка. Видно, что графики функции $a = a(\tilde{x})$ для различных циклонов отличаются незначительно. Зависимость (11) можно представить в виде:

$$a = f(\tilde{x}) \cdot a_{кр}(r'_{вых}; h'_{вых}; \dots), \quad (12)$$

где $\tilde{x} = (r - r_{вых}) / (R_0 - r_{вых})$ - для винтового ввода и лопаточного завихрителя;

$\tilde{x} = h / h_{ex}$ - для улиточного и тангенциального ввода.

Функцию $f(\tilde{x})$ можно приближённо описать формулой

$$f(\tilde{x}) = \sqrt{1 - \tilde{x}^{1,62}}. \quad (13)$$

Влияние геометрических параметров циклона на пылеулавливание показывает функция $a_{кр} = a_{кр}(r'_{вых}; h'_{вых}; \dots)$. В общем случае на величину коэффи-

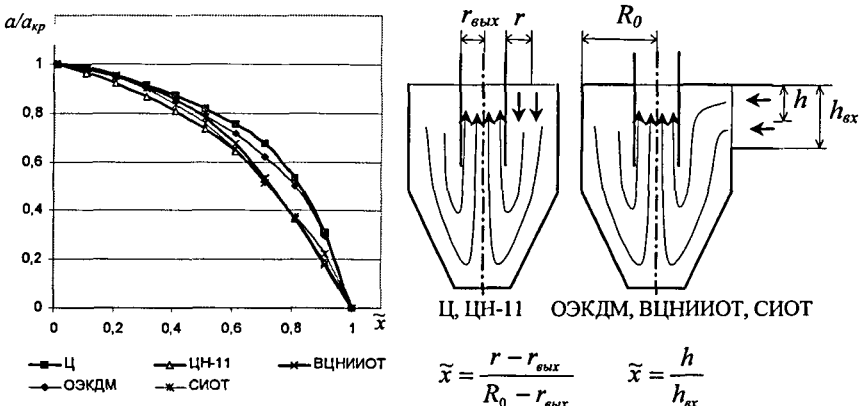


Рис. 7. Зависимость коэффициента a от начальной точки траектории

циента $a_{кр}$ оказывают влияние все геометрические параметры циклона. Исходя из анализа процесса пылеулавливания, выделены наиболее существенные геометрические параметры (см. рис. 8). Для винтового ввода это:

H_c' - относительная высота цилиндрической части циклона, находящаяся ниже среза выхлопной трубы;

H_k' - относительная высота конической части;

$r'_{вых}$ - относительный радиус выхлопной трубы;

$h'_{вых}$ - относительная величина заглиблення выхлопной трубы в циклон.

В случае улиточного ввода (а также простого тангенциального) добавится пятый параметр – высота входа h'_{ex} .

Аналитически выражение для функции $a_{кр}$ найти очень сложно. Поэтому для функции $a_{кр}=a_{кр}(r'_{вых}, h'_{вых}, H_c', H_k')$ в случае винтового ввода и $a_{кр}=a_{кр}(r'_{вых}, h'_{вых}, h'_{ex}, H_c', H_k')$ для циклонов с улиточным вводом получена приближённая формула в виде полинома. Для этой цели были спланированы и проведёны соответствующие численные эксперименты. Оба плана эксперимента по определению $a_{кр}$ представляли собой планы полнофакторного эксперимента для указанных выше факторов с варьированием каждого фактора на нескольких уровнях (см. табл. 1). Количество опытов для циклонов с винтовым вводом равно 240, а для циклонов с улиточным вводом – 540.

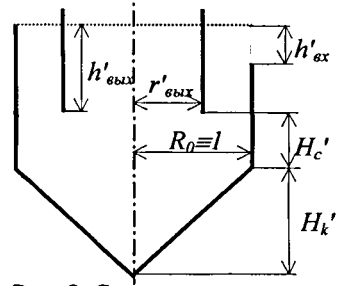


Рис. 8. Схема геометрических параметров, определяющих коэффициент $a_{кр}$

Таблица 1

Параметры планов эксперимента по определению зависимостей

$$a_{кр}=a_{кр}(r'_{вых}, h'_{вых}, H_c', H_k') \text{ и } a_{кр}=a_{кр}(r'_{вых}, h'_{вых}, h'_{ex}, H_c', H_k').$$

	Вид ввода	$r'_{вых}$	$h'_{вых}$	$h'_{ex}/h'_{вых}$	H_c'	H_k'
Количество уровней варьирования	Винтовой	5	4	-	4	3
	Улиточный	5	4	3	3	3
Интервалы варьирования	Винтовой	0,3÷0,7	0,5÷3,5	-	-0,4÷2	3÷9
	Улиточный	0,2÷0,8	0,5÷3,5	0,2÷1	0÷2	3÷9

Для аппроксимации функций $a_{кр}=a_{кр}(r'_{вых}, h'_{вых}, H_c', H_k')$ и $a_{кр}=a_{кр}(r'_{вых}, h'_{вых}, h'_{ex}, H_c', H_k')$ была использована специально разработанная программа для нахождения коэффициентов регрессии и отсеивания малозначащих факторов. В отличие от традиционного применения теории планирования эксперимента переход к относительным переменным не осуществлялся, а значимость того или иного фактора (взаимодействия) оценивалась по приращению ошибки при отсутствии этого фактора (взаимодействия).

По результатам эксперимента были подобраны аппроксимирующие полиномы (с погрешностью $\varepsilon < 10\%$).

Для винтового ввода

$$\begin{aligned}
 a_{sp} = & 0,8671 + 12,0494 \cdot r_{max}^{\prime 2} - 11,4962 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_c' - 3,9959 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_c^{\prime 2} + 3,4078 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_c^{\prime 2} + 3,0590 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_c' - \\
 & - 2,4420 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c^{\prime 2} - 2,3250 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_c' - 2,1426 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_c^{\prime 2} + 1,8557 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c' + \\
 & + 1,6779 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_c^{\prime 2} + 1,5232 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_k' \cdot H_c^{\prime 2} - 1,0903 \cdot H_c^{\prime 2} + 1,0645 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_c' + \\
 & + 0,9718 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c^{\prime 2} - 0,8486 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c^{\prime 2} - 0,808 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c' + 0,6271 \cdot H_k' \cdot H_c^{\prime 2} + \\
 & + 0,6217 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot h_{max}^{\prime} + 0,6021 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c' - 0,5634 \cdot H_k' \cdot H_c' + 0,5166 \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_c^{\prime 2} - 0,4807 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_k' - \\
 & - 0,3041 \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_c' + 0,2414 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_c^{\prime 2} \cdot H_k^{\prime 2} - 0,2410 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_c^{\prime 2} \cdot H_k' - 0,2240 \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c^{\prime 2} + 0,1929 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime 2} + \\
 & + 0,1891 \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c' - 0,1811 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c^{\prime 2} - 0,1533 \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_c' + 0,1326 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c' - 0,0851 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c^{\prime 2} + \\
 & + 0,0782 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c^{\prime 2} + 0,0762 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c' - 0,0657 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c' + 0,0625 \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c' - \\
 & - 0,0589 \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c^{\prime 2} + 0,0193 \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c^{\prime 2} - 0,0173 \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c' + 0,0058 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c^{\prime 2} - 0,0010 \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k^{\prime 2}
 \end{aligned} \quad (14)$$

Для улиточного ввода:

$$\begin{aligned}
 a_{sp} = & 0,0346 + 7,7635 \cdot r_{max}^{\prime 2} - 3,4051 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_c' - 1,5580 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime} + 0,7922 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_c' + 0,6699 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_c^{\prime 2} - \\
 & - 0,6181 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_k' + 0,2631 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_k' \cdot H_c' + 0,1744 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime 2} + 0,1530 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c' - 0,1389 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_c^{\prime 2} - \\
 & - 0,0587 \cdot H_c' - 0,0495 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_k' \cdot H_c^{\prime 2} - 0,0414 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot H_k' \cdot H_c' + 0,0275 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_c' + 0,0206 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_k^{\prime 2} + \\
 & + 0,0193 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot H_k' \cdot H_c' - 0,0182 \cdot r_{max}^{\prime} \cdot h_{max}^{\prime} \cdot H_c' - 0,0127 \cdot h_{max}^{\prime} + 0,0027 \cdot H_k' \cdot H_c^{\prime 2} - 0,00004 \cdot r_{max}^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime 2} \cdot H_k^{\prime 2} \cdot H_c^{\prime 2} \cdot h_{max}^{\prime}
 \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, формула (10) вместе с (12)–(15) определяют зависимость между основными факторами, влияющими на пылеулавливание в циклоне. Они определяют условие улавливания частиц.

Используя полученное необходимое условие осаждения частиц ((10), (12)–(15)) можно определить основные технические характеристики циклона.

Эффективность циклонного аппарата характеризуется диаметром улавливаемых частиц. Из формул (6), (10), (12) и (13) можно получить формулу для критического диаметра частиц:

$$d_{sp} = \frac{a_{sp} f_{ex}'}{\cos \beta} \sqrt{\frac{\mu_z R_0^3}{\rho_z Q_0}} \quad (16)$$

По величине коэффициента a можно судить о диаметре улавливаемых частиц. Из графиков рис. 7 следует, что циклон способен улавливать и частицы с диаметром менее критического. Их размер определяется коэффициентом a для конкретной точки впуска частицы. Для каждой начальной точки впуска, согласно принятой модели, можно вычислить коэффициент a (его определяют функции (12) и (13)) и диаметр улавливаемых частиц.

Зная зависимость (13) и считая распределение частиц по сечению входной трубы равномерным, можно рассчитать долю осаждаемых частиц определённого диаметра в циклоне. Так середине графика рис. 7 (т. е. при $\tilde{x} = 0,5$) соответствует диаметр частиц, улавливаемых с вероятностью 50% - d_{50} . Согласно формулам (12), (13) и (16):

$$a_{50} = 0,82 \cdot a_{sp}, \quad d_{50} = 0,82 \cdot d_{sp} \quad (17)$$

(a_{50} – значение коэффициента a , соответствующее d_{50}).

Формула (13) позволяет определить вероятность осаждения частиц пыли заданного диаметра, т. е. парциальный коэффициент очистки циклона.

Если выразить значение вероятности через отношение текущего диаметра частиц d_v к их критическому диаметру d_{kp} , то можно получить следующую формулу для парциального коэффициента очистки (для всех видов ввода):

$$\eta_n = \begin{cases} 1, & \text{при } d_v > d_{kp} \\ 0,2(d_v/d_{kp}) + 0,8(d_v/d_{kp})^4, & \text{при } d_v < d_{kp} \end{cases} \quad (18)$$

Используя (16) и (18) можно рассчитать полный коэффициент очистки η_v :

$$\eta_v = \int_0^{\infty} N_{ax} \eta_n d(d_v) \cdot \quad (19)$$

Определение коэффициента гидравлического сопротивления ζ_{ns} обычно проводится экспериментальным путём. Для его оценки можно воспользоваться корреляционной зависимостью Э. Н. Сабурова между числом Стокса Stk_{50} и коэффициентом сопротивления ζ_{ns} . Используя (16) и (17), после преобразований можно получить:

$$\zeta_{ns} = \frac{16,5 \cdot \cos^2 \beta}{a_{kp}^2 \cdot f_{ax}^2} \quad (20)$$

Это выражение вместе с (14) и (15) определяет коэффициент гидравлического сопротивления в зависимости от геометрических параметров циклона.

Адекватность математической модели доказывается сравнением справочных и расчётных параметров циклонов, а также сопоставлением полученных аналитических зависимостей с известными результатами.

В четвёртой главе рассматривается практическое применение результатов исследования для расчёта и оптимизации циклонных аппаратов. Описывается методика автоматизированного расчёта параметров циклона и построенная на её основе объектно-ориентированная САПР, приводится пример её практического применения.

Выбор параметров циклонного аппарата и режима его эксплуатации – сложный процесс, требующий учёта множества требований. Из-за неоднозначности выбора параметров циклона, возможна его оптимизация по какому-либо критерию. В работе приводится расчёт по оптимизации металлоёмкости циклона. Показано, что металлоёмкость циклона существенно возрастает при уменьшении a_{kp} ниже $0,5-0,6$, что соответствует современным циклонам общего применения. Оптимальным, с точки зрения металлоёмкости, является циклон с $a_{kp}=0,5$ ($r'_{вых}=0,3$; $h'_{вых}=0,5$; $h'_{ax}=0,1$; $H'_c=0$; $H'_k=4,05$).

Значительно ускорить и упростить процесс проектирования позволяет применение САПР, одной из составляющих которых является программное обеспечение. Используя результаты работы, по заданным параметрам циклона, режиму его эксплуатации и параметрам пылегазовой смеси можно рассчитать основные характеристики циклона. В соответствии с формулами (14)-(20) была разработана методика автоматизированного расчёта циклонов. На её основе разработана объектно-ориентированная САПР для расчёта параметров циклонных аппаратов. Она позволяет рассчитывать основные эксплуатационные характеристики циклонов (можно использовать при проектиро-

вании новых типов) и выбирать циклонные аппараты для конкретного производства, для чего она снабжена базой данных широко применяющихся циклонов.

Используя разработанную программу по расчёту циклонов, был произведён выбор и расчёт циклонов системы пылеочистки для известеобжигающих печей АО «Брянский завод силикатного кирпича». При работе с полной загрузкой завод превышает ПДВ известковой пыли в 2 раза. Расчёт показывает, что для удовлетворения выбросов ПДВ достаточно применить по одному циклону на печь (ЦН-15-900 для печи №1, ЦН-15-700 для печи №2). Применение циклонов позволит при относительно небольших затратах уловить около 83% известковой пыли, которую можно повторно использовать.

Вышеизложенные разработки внедрены в систему Высшего образования в рамках дисциплины «Инженерная экология».

Выводы и результаты работы.

1. Анализ литературы, посвященной проблеме пылеулавливания, показал актуальность улучшения характеристик пылеулавливающей аппаратуры, и в частности циклонных аппаратов. Однако существующие методики расчёта циклонов имеют узкую область применения и не позволяют прогнозировать параметры циклонов произвольной формы. Это приводит к необходимости разработки универсальных методик расчёта.
2. На базе уравнений теоретической механики и аэрогидромеханики построена математическая модель процесса центробежного пылеулавливания в циклоне, позволяющая исследовать траектории отдельных частиц.
3. Из анализа уравнений движения частиц в циклоне получены критерии подобия, определяющие траектории частиц.
4. Используя численный эксперимент, найдена зависимость, связывающая критерии подобия и определяющая необходимое условие улавливания частиц. Эта зависимость связывает двенадцать основных факторов, влияющих на пылеулавливание в циклоне.
5. В результате исследования математической модели получены функциональные зависимости, которые позволяют прогнозировать основные технические характеристики циклона. Эти зависимости также позволяют проводить оптимизацию циклонов. В работе приводится пример оптимизации циклона по металлоёмкости.
6. На основе полученных зависимостей разработана объектно-ориентированная САПР, позволяющая прогнозировать параметры циклонов на стадии их проектирования. САПР имеет базу данных известных циклонов, что позволяет выбрать тип и режим эксплуатации циклона для конкретного производства.
7. Результаты работы внедрены в учебный процесс и Брянский завод силикатного кирпича.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Безик Д. А. Особенности расчёта движения частиц пыли в циклоне. // Достижения науки и передовой опыт в производстве и учебно-воспитательный процесс. Материалы X межвузовской научно-практической конференции. – Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 1997. – С. 43-47.
2. Безик Д. А., Тайц О. Г. Математическая модель движения частиц пыли в циклоне. // Достижения науки и передовой опыт в производстве и учебно-воспитательный процесс. Материалы XI межвузовской научно-практической конференции. – Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 1998. – С. 20-22.
3. Безик Д. А. О времени нахождения частиц во вращающемся двухфазном потоке. // Вклад учёных и специалистов в национальную экономику. Материалы научно-технической конференции (13 – 15 мая 1998 г.), т. 2. – Брянск: Изд-во Брянской ГИТА, 1998. – С. 48-49.
4. Безик Д. А., Тайц О. Г. Определение коэффициента гидравлического сопротивления циклонов. // Вклад учёных и специалистов в национальную экономику. Материалы научно-технической конференции (13 – 15 мая 1998 г.), т. 2. – Брянск: Изд-во Брянской ГИТА, 1998. – С. 49-51.
5. Безик Д. А., Тайц О. Г. Определение коэффициента очистки для цилиндрических циклонов. // Вклад учёных и специалистов в национальную экономику. Материалы научно-технической конференции (13 – 15 мая 1998 г.), т. 2. – Брянск: Изд-во Брянской ГИТА, 1998. – С. 51-53.
6. Безик Д. А. Расчёт оптимальных режимов работы циклонов. // Труды международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии на рубеже третьего тысячелетия и пути их решения»; Часть II. – Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 1999. – С. 582-589.
7. Безик Д. А., Тайц О. Г. Определение оптимальных геометрических параметров циклонов. // Достижения науки в производстве и учебно-воспитательный процесс. Материалы XII межвузовской научно-практической конференции. – Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 1999. – С. 42-45.

Безик Дмитрий Александрович

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано в печать 17.04.2000. Формат 60 × 84 1/16. Бумага печатная.
Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз. Изд. № 321.

243365, Брянская обл., с. Кокино, Брянская государственная сельскохозяйственная академия.