

На правах рукописи

**Зайцев Николай Олегович**

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРЯМОТОЧНЫХ  
ЦИКЛОНОВ**

Специальность 05.23.16 – «Гидравлика и инженерная  
гидрология»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2007

Работа выполнена на кафедре гидравлики ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
Гиргидов Артур Давидович

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор  
Тананаев Анатолий Васильевич, СПб государственный политехнический университет.  
кандидат технических наук, руководитель лаборатории промышленной вентиляции Северо-западного научного центра гигиены и общественного здоровья РФ  
Крупкин Григорий Яковлевич.

Ведущая организация ООО «НПП Экоюрос Венто»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195257, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 года.  
Ученый секретарь диссертационного совета Орлов В.Т.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** В последние десятилетия нормирование концентрации пыли в воздухе зданий и помещений приобретает высокую актуальность. Согласно ГОСТ 12.1.005-88, концентрация различного рода пылей в воздухе рабочей зоны промышленных предприятий нормируется в пределах 1-6 мг/м<sup>3</sup>. В этих условиях особо актуальна очистка воздуха от пылевидных частиц.

Основными устройствами для очистки газов от пылей являются циклоны, обладающие хорошей эффективностью очистки при низких капитальных и эксплуатационных затратах. Отдельно выделяются так называемые прямоточные циклоны. Этот тип циклонов в последнее время приобретает значительную популярность в сфере пылегазоочистки производств малого и среднего класса, особенно в крупных городах, в связи с тем, что конструкция данного типа циклонов позволяет вставлять их непосредственно в воздуховод. Однако методики расчета циклонов данного типа в большинстве случаев привязаны к определенному типу пыли, а также не учитывают турбулентность закрученного потока

**Целью работы** является универсальный метод гидравлического расчета рабочей части прямоточного циклона.

**Научная новизна** определяется следующими основными результатами работы:

- схематизация потока газа в циклоне;
- разработка;
- оценка влияния неравномерности распределения тангенциальной составляющей скорости газового потока по поперечному сечению циклонного устройства на его эффективность;

- введение в расчетную модель влияния естественной турбулентности закрученного газового потока.

**Практическая ценность** данной работы заключается в разработке метода расчета эффективности прямооточных циклонных устройств, построении номограмм и графиков для вычисления эффективности и гидравлического сопротивления циклонных устройств.

**Реализация работы.** Результаты данной диссертационной работы применяются для расчета эффективности прямооточных циклонов на ОАО «СовПлим».

**Достоверность результатов.** Подтверждена соответствием результатов расчетов с экспериментами, проведенными на оборудовании ОАО «СовПлим», а также с результатами других авторов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на:

- XXII неделях науки СПбГПУ в 2002 и 2003 г;
- Научно-технической конференции «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона» в 2003 г;
- Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» в 2004 г;
- Международной научно-теоретической конференции «Гидравлика. Наука и дисциплина» в 2004 г.

**Авторский вклад** в печатных работах составил 3 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Она изложена на 104-х страницах, иллюстрирована 41 рисунком и содержит 18 таблиц. Список литературы включает 45 наименований. Приложены 2 акта испытания, протокол, паспорт прямооточного циклона ЦП-2500 и другие документы.

## Содержание работы

Циклонными аппаратами (или циклонами) называют аппараты, предназначенные для очистки жидкостей и газов от пылевидных частиц под действием центробежной силы.

В данной работе рассмотрены имеющиеся на настоящее время виды циклонных устройств; указаны различия между основными их типами. Особое внимание уделено прямоточным циклонным устройствам – их основным геометрическим особенностям и влиянию этих особенностей на процесс газоочистки (см. рис. 1). Оценены закручивающие устройства прямоточных циклонов: «винты» и «розетки». Введено понятие технической эффективности пылеулавливания (в дальнейшем – эффективность). Так будем называть отношение разности концентраций пылевидных частиц запыленного и очищенного газов (до и после циклона) к концентрации пылевидных частиц запыленного газа до циклона, выражаемое обычно в процентах.

Рассмотрено радиальное распределение осевой и тангенциальной скоростей вращения газа при его поступательном и вращательном движениях в циклонах. Отдельно отмечено отличие полей скорости при движении газа в прямоточных циклонах в сравнении с циклонами с тангенциальным подводом газа.

После рассмотрения различных методик расчета эффективности циклонных устройств (как с тангенциальным подводом воздуха, так и прямоточных), был проведен их сравнительный анализ. Показано, что большинство существующих на сей день методик расчета (в т.ч. Шиляева С.Н., Дроздова В.А., методика НИИОГАЗ) разработаны для циклонов с тангенциальным подводом запыленного газа, и перенос этих методов расчета на прямоточные циклоны требует особого обоснования.

Схема движения газового потока в теле проточного

циклона

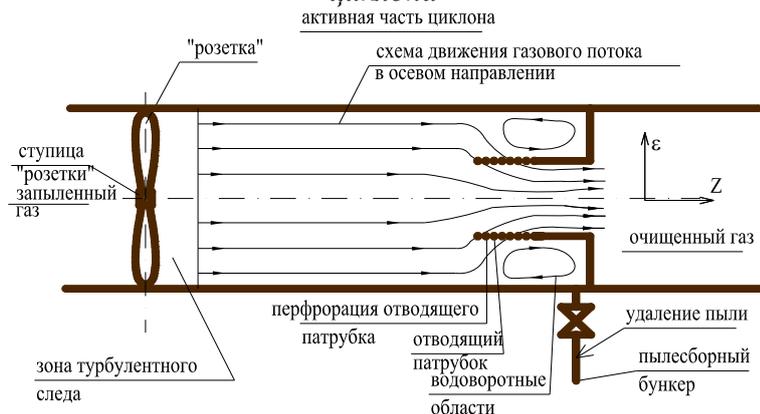


Рис. 1. с перфорацией отводящего патрубка.

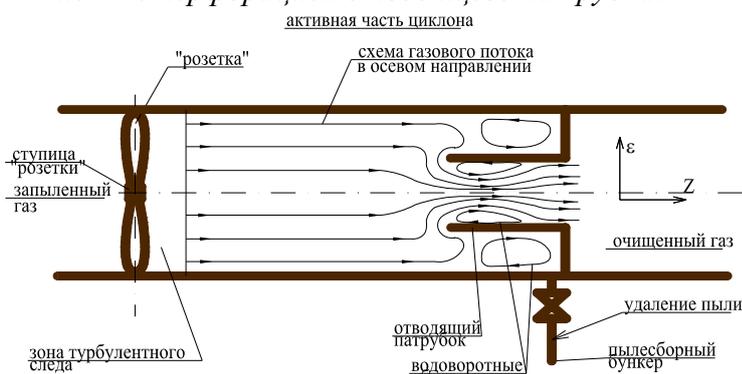


Рис. 2. без перфорации отводящего патрубка.

Другие методики, по которым возможен расчет проточных циклонов (напр. Шилаев С.Н.), разработаны для расчета конкретных марок циклонов или конкретных видов пылей и не могут в полной мере применяться для универсального расчета. Также ни в одной из этих расчетных моделей не учитывалась турбулизация закрученного газового потока.

Для создания модели движения пылевидной час-

тицы в теле циклона необходимо учесть следующее:

- проанализировать влияние распределения тангенциальной скорости  $u_\varepsilon = u_\varepsilon(r)$  на процесс осаждения пылевидных частиц в теле циклона;
- оценить влияние турбулентности закрученного газового потока на седиментацию пылевидных частиц. установить пределы применимости модели с учетом времени релаксации, то есть того времени, в течение которого скорость пылевидной частицы и переносящего ее объема газа уравниваются.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- схематизировать поток газа в циклоне;
- разработать модель движения частицы в закрученном газовом потоке;
- провести эксперименты по пылеулавливанию, и на экспериментальных данных проверить приемлемость принятых допущений;
- представить решения в виде рабочих номограмм, пригодных для использования в практических целях.

В связи с этим был проведен анализ движения пылевидной частицы в закрученном газовом потоке, и оценено влияние действия различных сил на пылевидную частицу.

Проведен анализ времени релаксации  $\tau$  и зависимость его от характеристик закрученного газового потока. Показано, что значение  $\tau$  в используемых на практике циклонах, не превышает 0,005 с. Уравнивание скоростей пылевидной частицы и переносящего ее элементарного объема газа (согласно Белоусову В.В.) происходит за промежуток времени в  $3\tau \approx 0,015$  с., что составляет примерно 10% от всего времени нахождения пылевидной частицы в теле циклона. В связи с малостью  $\tau$  пыле-

видной частицы на всей длине активной части циклона осевые и тангенциальные составляющие скорости частицы  $V(V_\varepsilon, V_z, V_r)$  и переносящего ее объема газа  $u(u_\varepsilon, u_z)$  принимаются равными:  $u_\varepsilon = V_\varepsilon$   $u_z = V_z$ .

Из закона сохранения количества движения для пылевидной частицы с массой  $m$ :

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = \sum \bar{F} = \bar{F}_{цб} + \bar{F}_{сопр} + \bar{F}_m + \bar{F}_{mg}, \quad (1)$$

где  $F_{цб} = mV_\varepsilon^2/r$  - центробежная сила, возникающая при движении частицы по криволинейной траектории со скоростью  $V_\varepsilon$ ;

$F_{н\ddot{a}d\ddot{a}}$  - сила сопротивления среды при движении частицы в радиальном направлении со скоростью  $V_r$  в переносящем ее элементарном объеме газа.

Основная проблема в пылегазоочистке – это осаждение мелких (диаметром  $d < 30$  мкм.) пылевидных частиц, поэтому принято, что при радиальном движении частицы имеет место стоксовская область сопротивления (число Рейнольдса по диаметру частицы  $Re_\varepsilon < 10$ ), и  $F_{н\ddot{a}d\ddot{a}} = 3\pi\mu V_r d_\pm$ ;

$F_m$  - сила Жуковского-Магнуса при вращении частицы вокруг своей оси и  $F_{mg}$  - сила тяжести, действующая на пылевидную частицу, пренебрежимо малы в сравнении с первыми двумя.

Полагая, что ускорение частицы в радиальном направлении пренебрежимо мало  $m \frac{d\bar{V}}{dt} \approx 0$ , представим выражение (1) в виде:

$$\frac{mV_\varepsilon^2}{r} = 3\pi\mu V_r d_\pm. \quad (2)$$

Будем рассматривать такие закручивающие устройства (розетки), в которых все параллельные линии тока при входе в циклон будут поворачиваться на один и тот же угол  $\alpha$ . Тогда тангенциальная скорость потока газа после закрутки его на лопастях розетки равна:

$$u_{\varepsilon} = v \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где  $v = Q/\omega$  средняя осевая скорость движения газа, ( $Q$  - расход газа, проходящего через циклон (производительность циклона),  $\omega$  - площадь поперечного сечения циклона). Из уравнения (3) видно, что при увеличении угла  $\alpha$  увеличивается тангенциальная составляющая скорости газового потока  $u_{\varepsilon}$ . В результате, согласно зависимости (2), увеличивается радиальная скорость движения частиц, и они в большем количестве (при фиксированной длине) осядут на стенках циклона. При этом увеличивается эффективность  $\eta$  очистки газового потока в циклоне, но возрастает гидравлическое сопротивление циклона.

Уравнение (2) с учетом (3) может быть записано следующим образом:

$$\frac{m(v \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2}{r} = 3\pi\mu V_r d_p. \quad (4)$$

Из уравнения (4) выразим величину  $V_r$ :

$$V_r = \frac{m(v \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2}{3\pi d_p \mu \cdot r}. \quad (5)$$

Согласно уравнению (5) все пылевидные частицы одного диаметра, находящиеся на одном расстоянии  $r$  от оси циклона, имеют одинаковую радиальную скорость  $V_r$ . В первом приближении примем, что тангенциальная составляющая скорости  $u_{\varepsilon}$  постоянна по сечению. Поскольку  $u_{\varepsilon} = V_{\varepsilon}$ , то получаем, что и  $V_{\varepsilon} = \operatorname{const}$ .

Для осаждения в циклоне пылевидные частицы должны за время нахождения в теле циклона пройти расстояние от места их нахождения на входе в расчетный участок циклона до стенки. Это расстояние будет равно  $R - r$ , где  $R$ - радиус циклона (см. рис. 3). Время на прохождение частицами пути  $dr$  равно:

$$dt = dr/V_r. \quad (6)$$

Интегрируя уравнение (6) от  $r$  до  $R$ , получим время, за которое частицы дойдут до стенки циклона:

$$t = \int_r^R \frac{dr}{(mV_\varepsilon^2/3\pi d_p \mu r)} = \frac{3\pi d_p \mu}{mV_\varepsilon^2} \int_r^R r dr = \frac{3\pi d_p \mu}{mV_\varepsilon^2} \frac{(R^2 - r^2)}{2}. \quad (7)$$

За это время частицы в циклоне пройдут от расчетного начального сечения в осевом направлении расстояние, равное:

$$S = V_z t = V_z \frac{9(R^2 - r^2)\mu}{d_p^2 V_\varepsilon^2 \rho_p}. \quad (8)$$

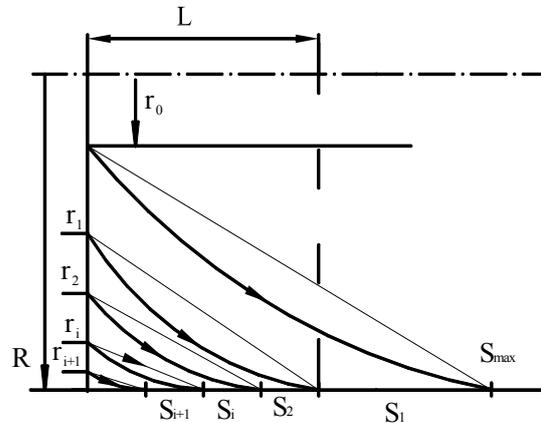


Рис. 3: Расчетная модель разбиения длины оседания частиц на отрезки

Разобьем интервал рассеяния пылевидных частиц в осевом направлении от 0 до  $S_{\max}$  на  $n$  равных отрезков. Для каждого из этих отрезков с помощью (8) рас-

считаем координаты точек  $r_i$  и  $r_{i+1}$ , из которых частицы попадут, соответственно, в начальную и конечную точку  $i$  – ого расчетного отрезка (см. рис. 3).

Координаты  $r_i$  каждого расчетного радиуса вычисляются по формуле, полученной из (8):

$$r_i = \sqrt{R^2 - \frac{S_i \cdot d_{\pm}^2 \cdot V_{\varepsilon}^2 \cdot \rho_{\pm}^2}{9\mu \cdot v \cdot \operatorname{tg} \alpha}} \quad (9)$$

Если исключить турбулентный разброс пылевидных частиц, то все частицы, находящиеся на входе в циклон в кольце, ограниченном радиусами  $r_i$  и  $r_{i+1}$ , попадут в отрезок  $S_{i+1}$ . Так как частицы распределены по входному сечению равномерно, то количество частиц, осевших на каждом  $i$ -том отрезке, пропорционально площади соответствующего расчетного кольца. При этом процентное отношение всех осевших на данном участке частиц к их общему количеству равно:

$$M_i = \frac{\pi(r_i^2 - r_{i+1}^2)}{\pi R^2} \cdot 100\% = \frac{r_i^2 - r_{i+1}^2}{R^2} \cdot 100\% \quad (10)$$

Таким образом, можно рассчитать количество пылевидных частиц любого заранее заданного диаметра, которые за единицу времени осядут на любом интервале внутренней поверхности циклона. Для получения значения эффективности пылеочистки  $\eta$  сложим значения  $M_i$ , полученные во всех расчетных интервалах внутренней поверхности циклона на его длине

$$\eta = \sum_{i=1}^{i=k(L)} M_i \quad (11)$$

В случае пыли, состоящей из нескольких фракций, следует вычислить эффективность улавливания пыли каждой фракции и потом вычислить интегральную эффективность циклона с учетом доли каждой

фракции в составе пыли по формуле (11)

$$\eta = \sum_{k=1}^n \eta_k \delta_k = \sum_{k=1}^n \eta_k \frac{C_{exk}}{C_{ex}}, \quad (12)$$

где  $\delta_k$  – процентное содержание k-той фракции в составе пыли;  $\eta_k$  – эффективность очистки циклоном пыли каждой фракции, вычисленная по формуле (12); n – число фракций, на которые разделены пылевидные частицы.

Для оценки влияния неравномерности распределения тангенциальной скорости по поперечному сечению циклона на эффективность пылеулавливания рассчитаем влияние на эффективность циклона распределения тангенциальной скорости движения газового потока по радиусу, рассмотрев несколько линейных зависимостей  $u_\varepsilon = f(r)$ :

$$u_\varepsilon = u_\varepsilon^0 + \varphi(r - r_0), \quad (13)$$

где  $u_\varepsilon^0$  – условная скорость газа на оси циклона (при  $r = r_0$ ), а  $\varphi$  – размерный параметр, определяющий характер распределения, который можно вычислить как  $\varphi = \frac{u_{\varepsilon \max} - u_{\varepsilon \min}}{R - r_0}$ .

Как показал расчет, расстояние, на котором осядут все частицы данного диаметра, практически (с точностью до 95%, согласно рис. 4), не зависит от параметра  $\varphi$  и от распределения скорости  $u_\varepsilon$ . Следовательно, допущение о том, что  $u_\varepsilon = \text{const}$ , приемлемо для вычисления минимального диаметра  $d_{\text{едсн}}$  частиц, полностью удаляемых из газового потока в циклоне. Однако необходимо учитывать еще и частичное улавливание циклонным устройством пылевидных частиц с диаметрами менее  $d_{\text{едсн}}$ . Для расчета осаждения такого рода пылевидных частиц необходимо учитывать не-

равномерность распределения тангенциальной скорости по поперечному сечению циклона. При проведении этого расчета рекомендуется использовать для распределения тангенциальной скорости газа следующую зависимость, полученную экспериментально для циклонов с осевым подводом запыленного газа:  $u_{\varepsilon} = (r/R)^{0,5+0,7} \cdot u_{\varepsilon}^0$ , где  $u_{\varepsilon}^0$  – тангенциальная скорость газового потока у стенки циклона ( $r = R$ ).

Рассмотрено влияние естественной турбулентности закрученного газового потока на движение в нем пылевидной частицы. Зона повышенной турбулентности за закручивающим устройством, обусловленная обтеканием газового потока лопастей розетки, согласно Лойцянскому Л.Г., составляет не более 15% от общей длины циклона. Эту зону мы исключаем из расчетной модели. Типичные значения радиальной пульсационной скорости  $u_r''$  были приняты равными стандарту поперечной пульсационной скорости. Согласно экспериментальным данным (Карпов С.В., Сабуров Э.Н.), значение стандарта пульсационных скоростей имеет порядок  $(0,03 \div 0,06)v_z$ . Примем

$$\sqrt{u_r'^2} = 0,06v_z. \quad (14)$$

При этом полагаем, что при значениях радиальной скорости движения пылевидной частицы  $u_r'' > V_r$  пылевидные частицы не будут осаждаться в теле циклона и будут выноситься газовым потоком. Согласно (14) и (5), это условие можно записать как:

$$0,06v_z > \frac{d_+^2 V_{\varepsilon}^2 \rho_+}{18r\mu}. \quad (15)$$

Из условия (15) можно выразить минимальный диаметр частиц  $d_{\min}$ , осаждение которых в данном ци-

клоне возможно с учетом турбулентных пульсаций газового потока

$$d_{\min} = \sqrt{1,08 \frac{R\mu}{v_z \rho \cdot \operatorname{tg} \alpha}}. \quad (20)$$

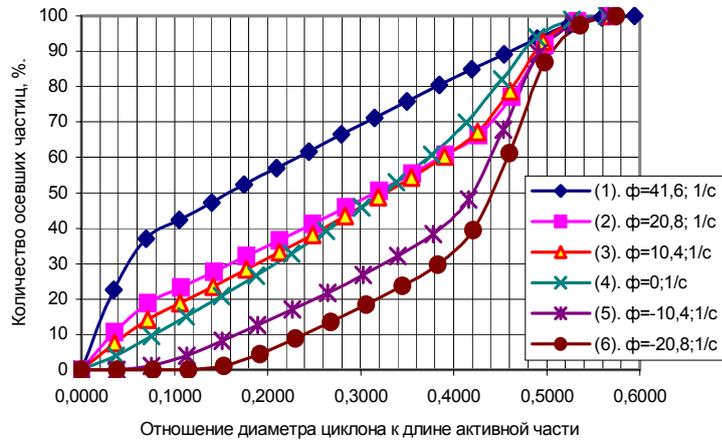


Рис. 4: Расчет свободного пробега пылевидных частиц в циклоне для различных распределений  $i_\epsilon$ .

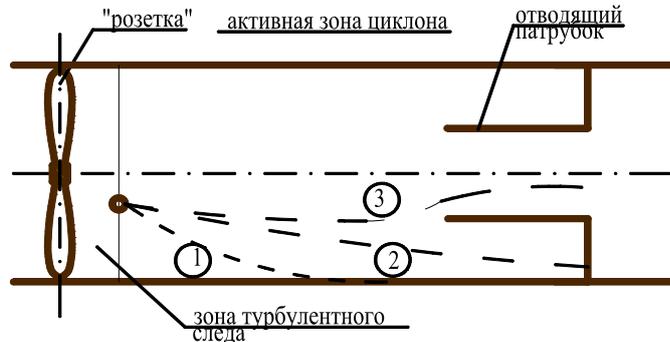


Рис. 5: Схема осаднения пылевидных частиц в циклонном устройстве (типичные траектории частиц)

1. полностью осаждающихся;
2. осаждающихся частично в теле циклона;
3. осаднение которых в циклоне невозможно ( $d < d_{\min}$ ).

Частицы с диаметрами более  $d_{\min}$  будут осаждаться в теле циклона полностью или частично, в зависимости от длины пути осаждения (рис. 4).

Методика расчета длины полного осаждения пылевидных частиц под воздействием турбулентных пульсаций была разработана на основе методики расчета длины осаждения частиц в пылеосадочных камерах и отстойниках, разработанной Гиргидовым А.Д., и был произведен пересчет величин гидравлических крупностей частиц на скорость их движения в радиальном направлении в закрученном потоке  $V_r$ .

В результате расчетов также была показана независимость величины  $d_{\text{едн}}$  от распределения тангенциальной скорости потока газа  $u_\epsilon$ . Однако, данное распределение влияет на интегральную эффективность циклона за счет частичного осаждения частиц в теле циклона, что и было отражено в расчете.

Методика применялась на ОАО «СовПлим» для определения номинальных паспортных значений эффективностей пылеочистки прямоточных циклонов ЦП-1000 и ЦП-2500, а также для разрабатываемого циклона ЦП-4000. Эффективность циклонов определялась по кварцевой пыли, плотностью  $2630 \text{ кг/м}^3$ , массовым методом, при разделении ее на фракции ситовым анализом.

На ОАО «СовПлим» была проведена серия экспериментов по расчету эффективности очистки прямоточных циклонов марки ЦП-2500. Эффективность измерялась для фракций <5, 5-10, 10-25, 25-50, >50 мкм. При неизменных расходах  $1000$  и  $2000 \text{ м}^3/\text{час}$  были измерены (при известном фракционном составе) масса пыли подаваемой в циклон, и масса пыли, осевшей в нем. Методики расчета показали хорошее соответствие с результатами проведенных испытаний.

Был проведен фракционный анализ пыли, осевшей в циклоне, и по полученным данным рассчитана его опытная эффективность. Погрешность проводимых измерений по расходу газа, подаваемого в циклон, составляла до 5% от величины расхода, погрешность при определении количества пыли, осевшей в циклоне составляла до 25%. Погрешность вычисления эффективности циклона – не более 3%. Было проведено 12 серий опытов, в результате которых были получены указанные в таблице 1 и на рис. 6 значения интегральной эффективности циклонного устройства, которые были сопоставлены с расчетными значениями.

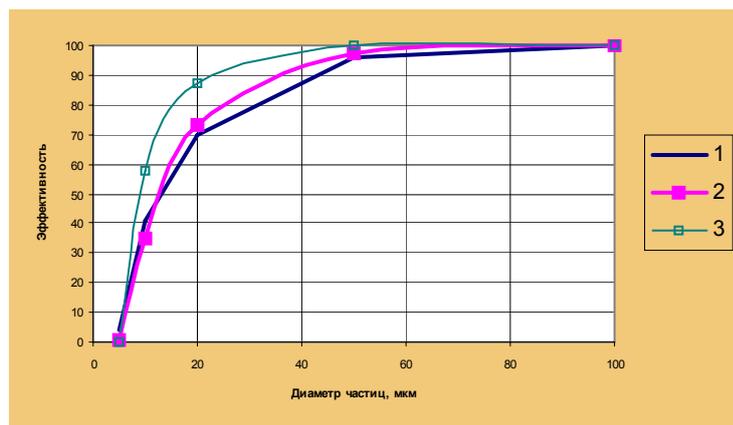


Рис. 6. Величины эффективности пылеулавливания

1. - вычисленные по разработанной методике;
2. - полученные экспериментально;
3. - вычисленные по методике Шиляева А. И.

В результате расчетов были решены прямая (нахождение эффективности пылеулавливания циклонного устройства) и обратная (нахождение геометрических параметров циклонного устройства) задачи.

На рисунке 6 приведено сопоставление величин

эффективности пылеулавливания, вычисленных по разработанной методике, полученных опытным путем, а также вычисленных по существующей расчетной методике. В качестве поверочной была выбрана методика Шиляева А.И., так как она позволяет рассчитывать эффективность пылеулавливания в том числе и прямоточных циклонов.

Наим. фракции	Методика Шиляева А.И., %	Методика, рассмотренная в данной работе.	Эксперимент. эффективность, %.
>1.5 мкм.	0	0	0
1.5-5 мкм.	0	0	0
5-10 мкм.	0.3	4	0.9±0.1
10-50 мкм.	87	70	73.4±1.4
>50 мкм.	100	96	97±1.0

*Табл. 1. Сравнение результатов, полученных по различным расчетным моделям*

### **Основные результаты и выводы**

Предлагаемая методика расчета эффективности очистки газа от пылевидных частиц в прямоточном циклоне позволяет:

- рассчитать эффективность циклона с заданными геометрическими характеристиками при известном расходе газа для любого заданного диаметра пылевидных частиц, с учетом их частичного осаждения.
- при заранее заданной эффективности и известном расходе газа, рассчитать длину циклона (решить обратную задачу).
- при известном фракционном составе пыли и расходе газа рассчитать интегральную эффективность циклона с заданными геометрическими параметрами.

- рассчитать минимальный диаметр пылевидных частиц, полностью осаждаемых в циклоне с заданными геометрическими характеристиками.
- определить минимальный диаметр пылевидных частиц, который возможно осадить в теле циклона.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы**

1. Зайцев Н.О., Иокша Е.О., Гиргидов А.Д., Учет неравномерности скоростей по сечению циклона. Материалы межвузовской научной конференции. СПб. Изд. СПбГПУ 2003., Ч. 1, с. 114. (авт. вклад – 60%)
2. Зайцев Н.О., Гиргидов А.Д., Расчет эффективности циклона с винтовым подводом воздуха. Материалы практической конференции и школы-семинара. СПб. Изд. СПбГПУ 2003. с. 48-54. (авт. вклад – 60%)
3. Зайцев Н.О., Зайцев О.И., Расчет эффективности прямоточного циклона при неравномерной скорости закручивания потока по сечению циклона. Материалы международной научно-теоретической конференции. СПб, Изд. СПбГПУ 2004. с. 99-100. (авт. вклад – 50%)
4. Зайцев Н.О. Расчет эффективности очистки циклонов с винтовым подводом воздуха. Материалы V и VI всероссийских научно-технических конференций. Рыбинск. Изд. РГАТА 2004. с. 221-222.
5. Зайцев Н.О. Расчет эффективности пылеулавливания циклонного устройства для очистки газов от пыли. Научно-Технические Ведомости СПбГПУ №5-1, 2006. с. 197-202. (издание списка ВАК)