



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2025.4.4>

УДК 519.6  
ББК 30в6

Дата поступления статьи: 17.10.2025  
Дата принятия статьи: 22.11.2025

## ОБЗОР ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ ЦИКЛОННОГО ТИПА<sup>1</sup>

**Егор Сергеевич Савин**

Аспирант кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,  
Волгоградский государственный университет  
[e.s.savin@volsu.ru](mailto:e.s.savin@volsu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-7915-121X>  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Александр Валентинович Хоперсков**

Доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой  
информационных систем и компьютерного моделирования,  
Волгоградский государственный университет  
[khoperskov@volsu.ru](mailto:khoperskov@volsu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-0149-7947>  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Проблема очистки газа от аэрозолей и пылевых частиц является актуальной для самых различных производств. Обзор посвящен некоторым аспектам работы пылеуловителей циклонного типа, широко применяемых для сепарации твердых частиц и газа. Прежде всего, описываются некоторые возможности вычислительной гидродинамики для анализа работы пылеуловителей, в которых формируются закрученные потоки внутри аппарата. Это может обеспечивать эффективное разделение газа и пыли за счет действия центробежной силы. Обсуждаются результаты численного моделирования динамики газа и пылевой компоненты в зависимости от внутренней геометрии камеры, особенностей входных и выходных каналов газа, скорости притока газа и других факторов. Рабочие режимы циклонов со скоростью втекания 5–30 м/с формируют развитую турбулентность с типичными скоростями пульсаций порядка 0,3–1,5 м/с. Тем самым, структура течений в существенной мере определяется турбулентностью и соответствующей турбулентной вязкостью. Анализ результатов газодинамического моделирования с разными моделями турбулентности (МТ) показывает сильную чувствительность структуры течения и эффективности сепарации от выбора МТ. Это

ставит проблему подбора МТ для конкретной конструкции пылеуловителя и свойств пылевой фракции. Вычислительные газодинамические эксперименты позволяют эффективно решать задачу оптимизации пылеуловителей, отбирая конструкции с более высокой эффективностью сепарации газа и частиц, минимизируя падение давления в системе.

**Ключевые слова:** циклонные пылеуловители, вычислительная газодинамика, турбулентность, гидравлическое сопротивление, динамика пылевых частиц, эффективность очистки.

## Введение

Проблема очистки воздуха и промышленных газов от разнообразных аэрозолей и пылевых частиц является важнейшим требованием экологических норм и производственных технологических процессов [21; 29; 49; 54]. Циклонные аппараты сохраняют свое значение, несмотря на распространение разнообразных систем с фильтрами. Сепарация твердых частиц во вращающемся газовом потоке имеет длинную историю с конца XIX века [14]. Для обозначения аппаратов, где происходит разделение твердой и газовой фракций за счет центробежной силы, традиционно используют термин циклонный пылеуловитель или просто циклон. В настоящее время такие системы являются либо основным инструментом для очистки газа от твердых частиц, либо их используют в качестве предварительного способа обеспыливания перед применением рукавных фильтров или электростатических методов. Доля циклонов среди всех аппаратов очистки газов превышает 90 процентов. Оценки дают, что около 80 процентов массы всей уловленной пыли является вкладом устройств циклонного типа [21]. Монографии и обзоры [2; 3; 9; 10; 12; 13; 16; 17; 25; 50] посвящены самым различным аспектам проектирования и применения техники для пылеулавливания.

Новый этап научных исследований связан с возможностью моделировать трехмерную динамику газа и твердых частиц на основе качественных численных газодинамических моделей с высоким разрешением [63; 73; 84; 88; 96; 101]. Рисунок 1 показывает динамику числа публикаций, в которых исследуются циклоны. Мы видим рост с начала XXI века, связанный во многом с применением вычислительных экспериментов

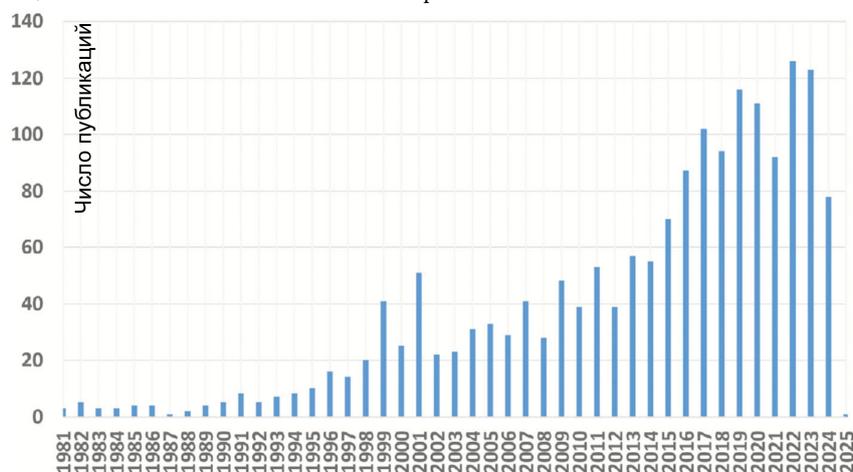


Рис. 1. Число статей в базе Web of Science по исследованию циклонных сепараторов за период с 1981 до середины 2024 года [63]

[63; 70; 72–74; 100; 105]. Расчеты течений показывают большие возможности повышения эффективности очистки и снижения энергетических затрат за счет выбора наиболее эффективных параметров, определяющих как конструкцию аппаратов и отдельных узлов, так и режимов их работы [16; 80; 104; 110; 124].

Большое число разнообразных конструкций пылеуловителей определяется как потребностями широкого круга технологических процессов и производственных решений, так и в определенной мере национальными традициями и историей совершенствования таких аппаратов [14; 16; 25; 39; 63; 67]. Широкое применение систем из нескольких циклонов, объединенных в батареи (групповой циклон), еще более расширяет ряд конструктивных особенностей такого рода аппаратов и увеличивает сложность оптимизации их работы [9; 13; 30]. Циклоны и их батареи используются совместно с фильтрами для очистки воздуха в двигателях спецтехники [78]. Проектирование систем вентиляции, поддержания теплового режима и очистки воздуха от аэрозолей является частью задач, возникающих при создании умного дома и умного города [32; 58; 59]. Сильно неоднородный характер газовых течений вблизи сложных поверхностей в аспирацион-

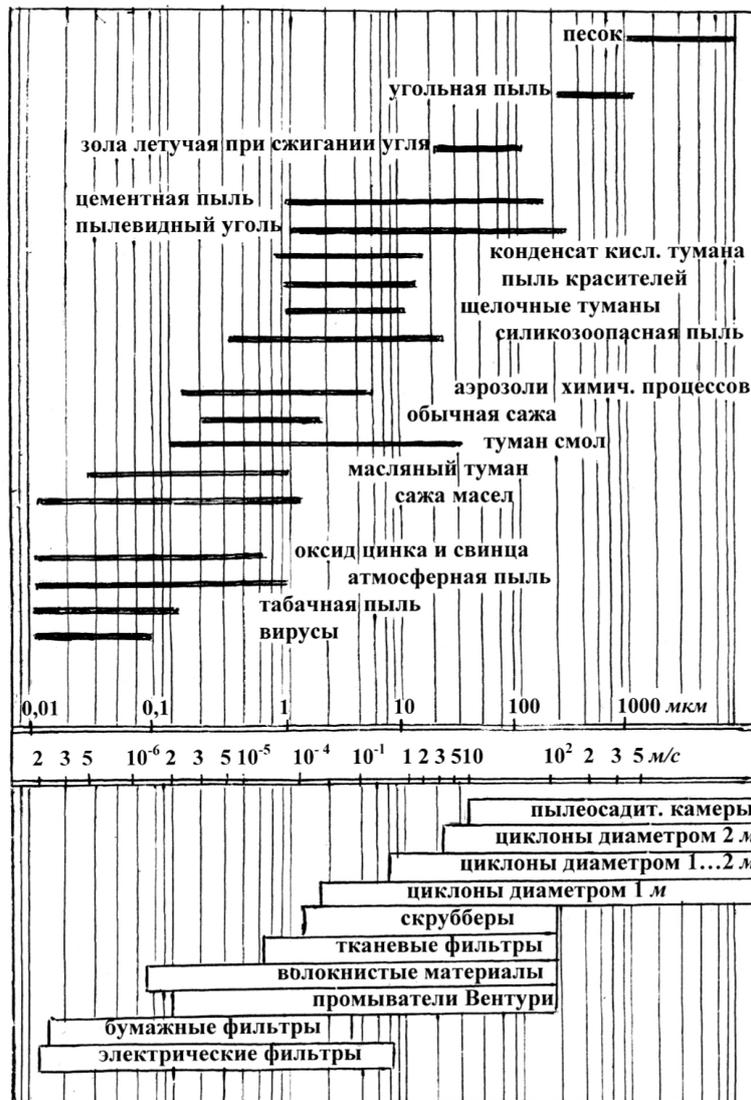


Рис. 2. Типы пыли, соответствующие размеры и способы улавливания [45; 46]

ных и вентиляционных системах требует применения качественных численных моделей [52; 107].

Помимо аппаратов циклонного типа применяются пылеосадочные камеры (Dust Settling Chamber или Gravity Settling Chamber) прежде всего при очень больших объемах запыленного газа, что обеспечивает первичную очистку воздуха от наиболее крупных фракций пыли [21; 55; 118]. К числу сухих установок относятся также рукавные фильтры, электростатические аппараты. Мокрые пылеулавливатели (скрубберы) различных типов используют дополнительное увлажнение в рабочей камере. Выбор тех или иных устройств и методов определяется рядом факторов, в том числе свойствами пыли (см. рис. 2).

Целью данного обзора является анализ результатов прежде всего численного газодинамического моделирования внутри рабочей зоны циклонов. Значительное внимание уделяется влиянию конструктивных особенностей входных патрубков на структуру течения и падение давления, определяющее гидравлическое сопротивление. Эти факторы существенно влияют на траекторию пылевых частиц разного размера и эффективность сепарации пыли и газа.

## 1. Системы циклонического типа для очистки газа

Рассматриваемые устройства состоят из камеры с одним или несколькими входными каналами, через которые поступает газ с пылью, и преимущественно с одним выходным каналом для очищенного газа. В нижней части камеры находится бункер для сбора твердой фракции [10; 21; 22]. Втекающий газ имеет угловой момент относительно оси симметрии, что приводит к формированию основной внешней вихревой структуры (рис. 3а, синяя линия). Газ вместе с твердыми частицами по спирали опускается в нижнюю часть камеры, где образуется восходящий поток с меньшим угловым моментом (рис. 3а, красная линия). Ключевым для рассматриваемых здесь устройств является наличие вращающегося газового потока, что обеспечивает сепарацию частиц в потоке из-за действия центробежной силы при движении частицы по окружности. Этот эффект сильнее действует на более тяжелые частицы большего размера, концентрация которых увеличивается ближе к стенке камеры [20; 84]. Тяжелые пылинки остаются внизу в пылесборнике. Маленькие частицы сохраняются в восходящем потоке и уносятся через выходной патрубок (рис. 3б).

Для обозначения аппаратов данного типа встречается различная терминология в зависимости от особенностей конструкций [2; 3; 21].

### 1.1. Примеры конструкций циклонических пылеуловителей

Имеется огромное количество различных конструкций и модификаций пылеуловителей, внутри которых газ вращается в рабочей камере и центробежная сила является важнейшим фактором очистки от твердых частиц. Описание особенностей и классификацию различных аппаратов можно найти в монографиях, учебниках и обзорах [2; 9; 12–14; 16; 21; 30] и др. Серийное отечественное производство циклонов и вихревых пылеуловителей дополняется опытно-экспериментальными аппаратами для обеспечения очистки всего разнообразия технологических и аспирационных газов [10; 25]. В нашей стране широко распространены стандартные конструкции циклонов ВЦНИИОТ (Всесоюзный центральный научно-исследовательский институт охраны труда), СИОТ

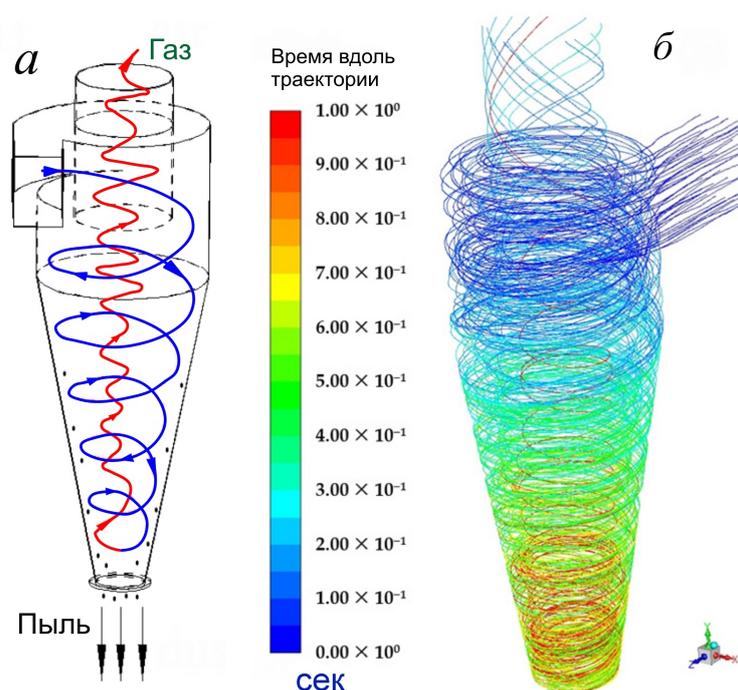


Рис. 3. *а* — структура течения газа в циклоне (синяя линия — нисходящий поток, красная линия — восходящий поток); *б* — траектории движения различных пылевых частиц по результатам моделирования [109]. Цвет показывает время нахождения частицы вдоль данной траектории

(Свердловский институт охраны труда), ЛИОТ (Ленинградский институт охраны труда), Гипродревпрома, НИИОГаза (Научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов) и их модификации (см., например, рис. 1.3 в [21] и обзор [14]).

Закрученные потоки являются частью самых различных технологических решений [17; 50]. Вихревая технология может обеспечивать улучшение процессов перемешивания, массо- и теплопередачи в химических аппаратах [94]. Отметим, что закручивающиеся потоки являются частью некоторых систем местной вытяжной вентиляции, создающих вихревые зоны [53; 106]. В то же время вихревые зоны способствуют увеличению местного сопротивления [107]. Отметим широкое использование закрученных потоков в задачах турбулентного горения [19], включая акустические процессы в неравновесном химически активном газе [51].

Целый ряд различных конструкций пылеуловителей обсуждается в работе [5]. Авторы [42] рассматривают различные характеристики циклонов для решения конкретных задач с учетом специфики технологических процессов. Отдельным классом являются мультициклоны (многосекционные циклоны или групповые циклоны), состоящие из нескольких циклонных пылеуловителей в одной рабочей камере, что позволяет очищать большие объемы газа [9; 13; 30], несмотря на то что эффективность одного циклона, как правило, оказывается выше.

Здесь мы обсудим только некоторые конструкции, для которых построены качественные численные модели (рис. 4). Наиболее распространенной формой является осесимметричная рабочая камера, состоящая из последовательности цилиндров и усеченных конусов. Каждый из сегментов выполняет определенную функцию в формировании подходящей структуры потока газа и служит для повышения эффективности отделения

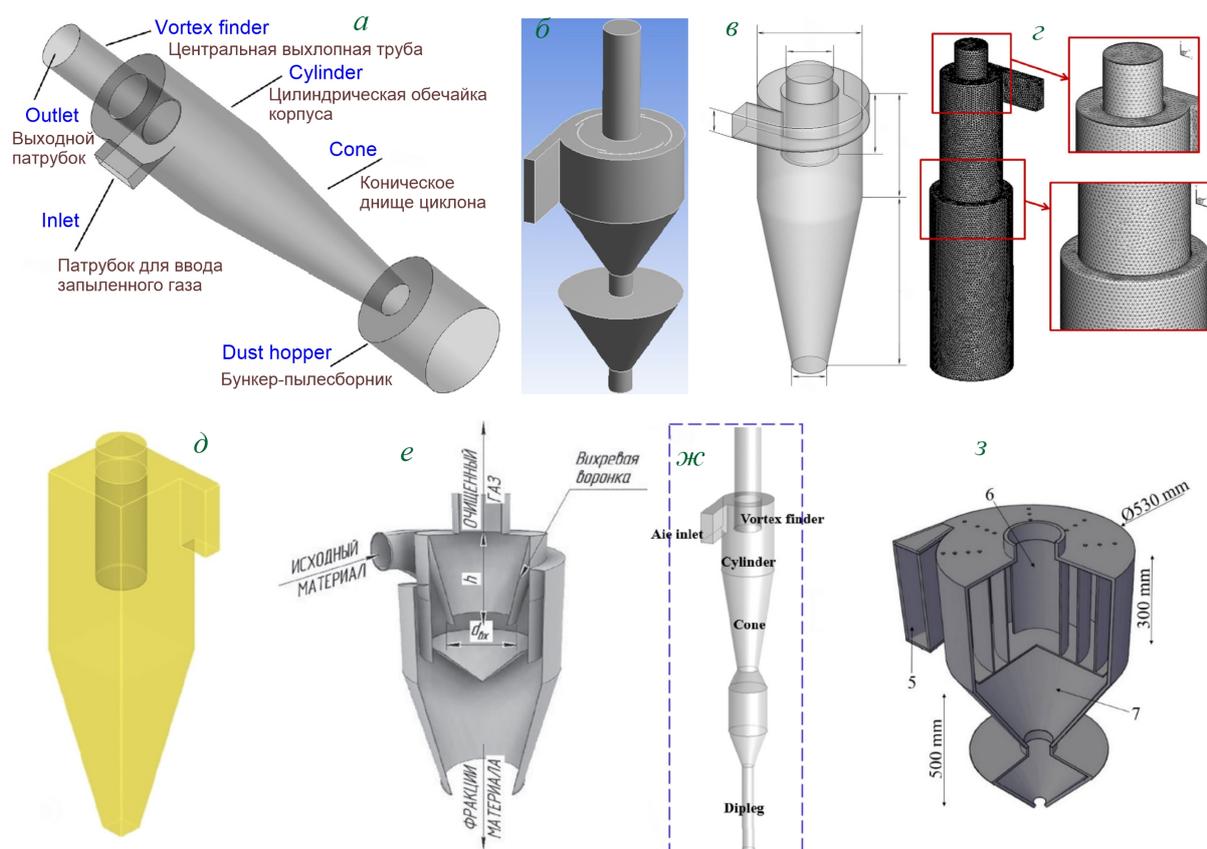


Рис. 4. Некоторые примеры пылеуловителей циклонного типа [21; 40; 72; 85; 86; 90; 99; 101; 105; 112]

твердых частиц от газа.

Имеются многочисленные попытки повысить эффективность сепарации посредством последовательного применения нескольких циклонов, когда очищенный газ из первого аппарата идет во второй циклон для доочистки (см. рис. 5а, е). Более сложные конструкции моделируются в [74], где последовательность циклонов образует так называемую циклонную башню (cyclone tower).

Циклоны могут входить в состав различных машин. Применение пылеулавливающих циклонов очень широкое, отметим любопытное решение для сельскохозяйственного комбайна на примере уборки арахиса (см. рис. 6). Вычислительные и натурные эксперименты показали близкие значения для эффективности улавливания пыли с целью уменьшить вынос пыли из семян в атмосферу [121]. Авторы посредством численного моделирования провели оптимизацию конструкции циклона, подбирая размеры входных и выходных патрубков, основной камеры циклона и скорость подачи запыленного воздуха. Каждый технологический процесс в конкретной отрасли может иметь свои особенности, требующие отдельного анализа и оптимизации конструкции [4; 33; 35; 42; 93; 108; 120].

Мы не обсуждаем здесь проблемы динамики частиц в потоке, связанные с ее несферичностью. Форма пылинки сильно зависит от ее происхождения. Линейные размеры некоторых видов частиц в разных направлениях могут различаться на порядок. Особенно большое различие в шкалах имеет древесная, текстильная, асбестовая пыль при соотношении сторон до двух порядков. Традиционно для частицы принимается так называемый эффективный диаметр  $d_{eff}^{(p)}$ , при котором закон движения такой частицы

близок к движению реальной несимметричной частицы. Любое отклонение формы от сферы приводит в среднем к увеличению суммарного сопротивления, поэтому принимается  $d_{eff}^{(p)} > d_{av}^{(p)}$ , где  $d_{av}^{(p)} = \left( \frac{6m^{(p)}}{\pi\rho^{(p)}} \right)^{1/3}$ ,  $m^{(p)}$  — масса частицы,  $\rho^{(p)}$  — ее массовая плотность. Ниже везде под диаметром  $d^{(p)}$  понимается эффективная величина  $d_{eff}^{(p)}$ .

### 1.2. Встречные закручивающиеся потоки

Выделим в виде отдельного типа аппараты с так называемыми встречными закрученными потоками (ВЗП) [2; 3; 5; 21; 22; 28; 43; 57]. Газ поступает через входные патрубки 2 и 3 (см. рис. 7а). Отличительной особенностью ВЗП является наличие второго входного канала 3, расположенного в нижней части рабочей камеры 1. Выход газа происходит вверх вдоль оси симметрии циклона. Этот газ подкручивается с использованием завихрителей различной конструкции. Как правило, используется аксиально-лопаточный завихритель, создающий у восходящего потока угловой момент  $L^{(2)}$ , который должен быть сонаправлен угловому моменту нисходящего потока от верхнего входа  $L^{(1)}$ . Внизу располагается отбойная шайба 6, ограничивающая движение нисходящего винтового движения от верхнего входа 2.

Рисунок 7 показывает различные конструкции ВЗП. Они различаются формой рабочей камеры и другими характеристиками: ВЗП с цилиндрической камерой (а); пы-

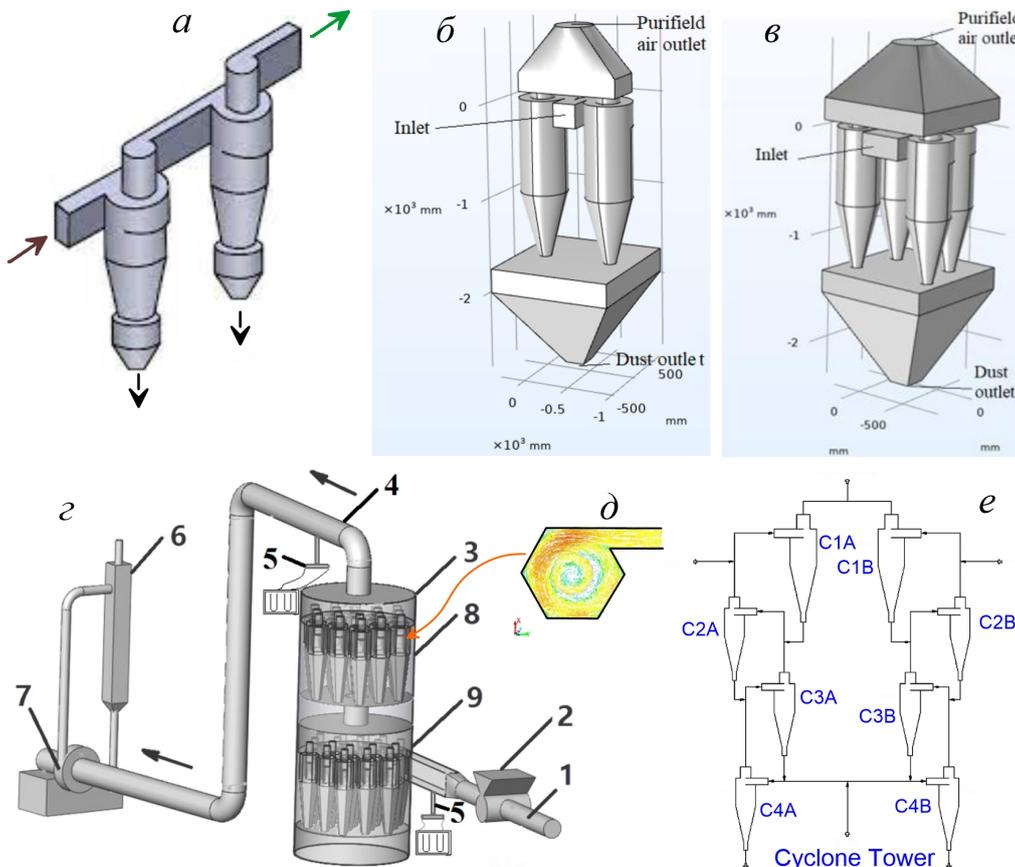


Рис. 5. Примеры конструкций групповых циклонов [74; 84; 104]

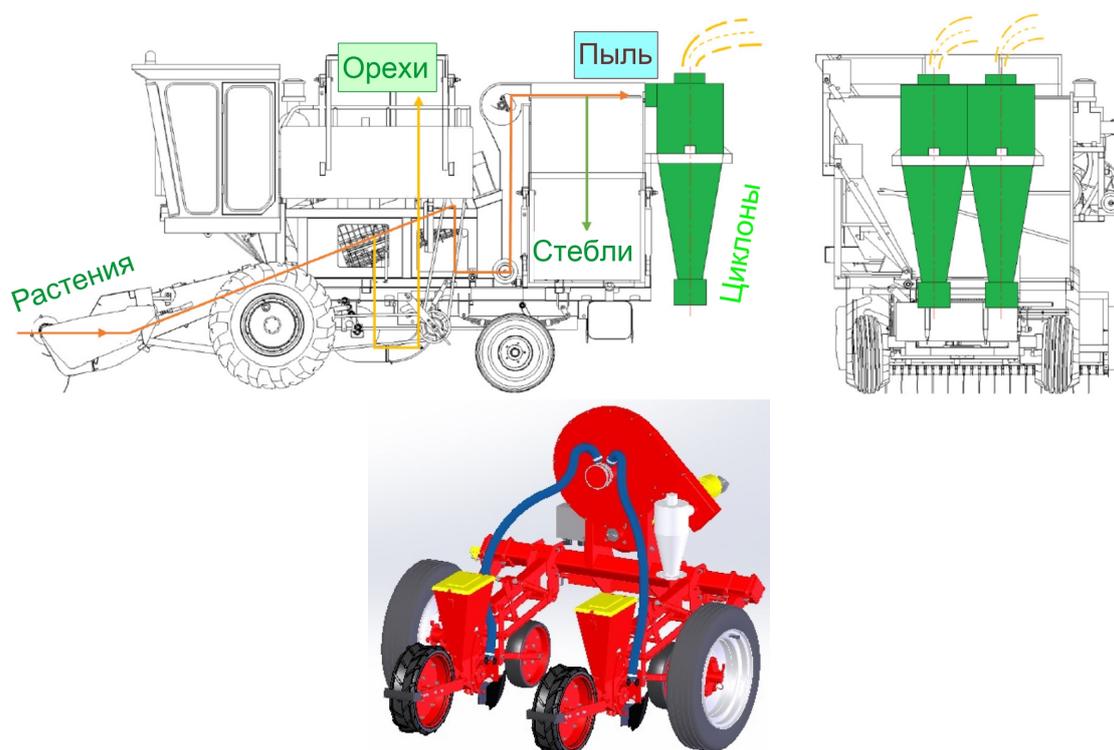


Рис. 6. Комбайн для уборки орехов с циклоном (верхний ряд) [109]. Пример установки циклона на пневматическую сеялку для уменьшения выноса пыли в атмосферу (внизу) [121]

леуловитель с коническим корпусом конструкции Н.П. Володина и др. (б); вихревой пылеуловитель конструкции О.С. Кочетова и др. (в); групповой прямоточный вихревой пылеуловитель с улиточными завихрителями (г); вихревой пылеуловитель с расширяющимся корпусом конструкции Е.И. Богуславского и др. (д); второй нижний патрубок заходит в рабочую камеру из пылевого бункера (е). На панели ж показана схема циклона, для которой проведены расчеты в разделе 4.

Отметим пылеуловитель с ротором 8, снабженным лопастями для дополнительной закрутки потока (рис. 7в). Ротор приводится во вращение устройством 10 на верхней крышке 9. Такой ротор обеспечивает достаточно мощный поднимающийся вихрь для потока из канала 5, что способствует дополнительному перемещению пылевых частиц к стенкам камеры и повышению эффективности очистки. Как и для традиционных циклонов, конструкции ВЗП используются также для компоновки групповых пылеуловителей (см. рис. 7г).

Имеется несколько терминов для данного типа аппаратов, помимо ВЗП. В частности, используются термины «вихревые противоточные пылеуловители», «вихревые пылеуловители на встречных закрученных потоках», «вихревые пылеуловители». На английском терминология еще не устоялась из-за небольшого числа работ, и встречаются следующие английские обозначения: contrary turning stream instrument, counter swirling flows, vortex dedusters to counterclaims twirled flow, vortex dust collectors on counter swirling flows (CSF) [97; 117].

Имеются расчеты полей скоростей внутри некоторых конструкций таких аппаратов [18; 28; 103]. В работе [18] исследована эффективность увеличения тангенциальной компоненты скорости с использованием улиточного подвода воздуха и аксиально-лопаточного завихрителя. Численное моделирование дает то, что одновременная уста-

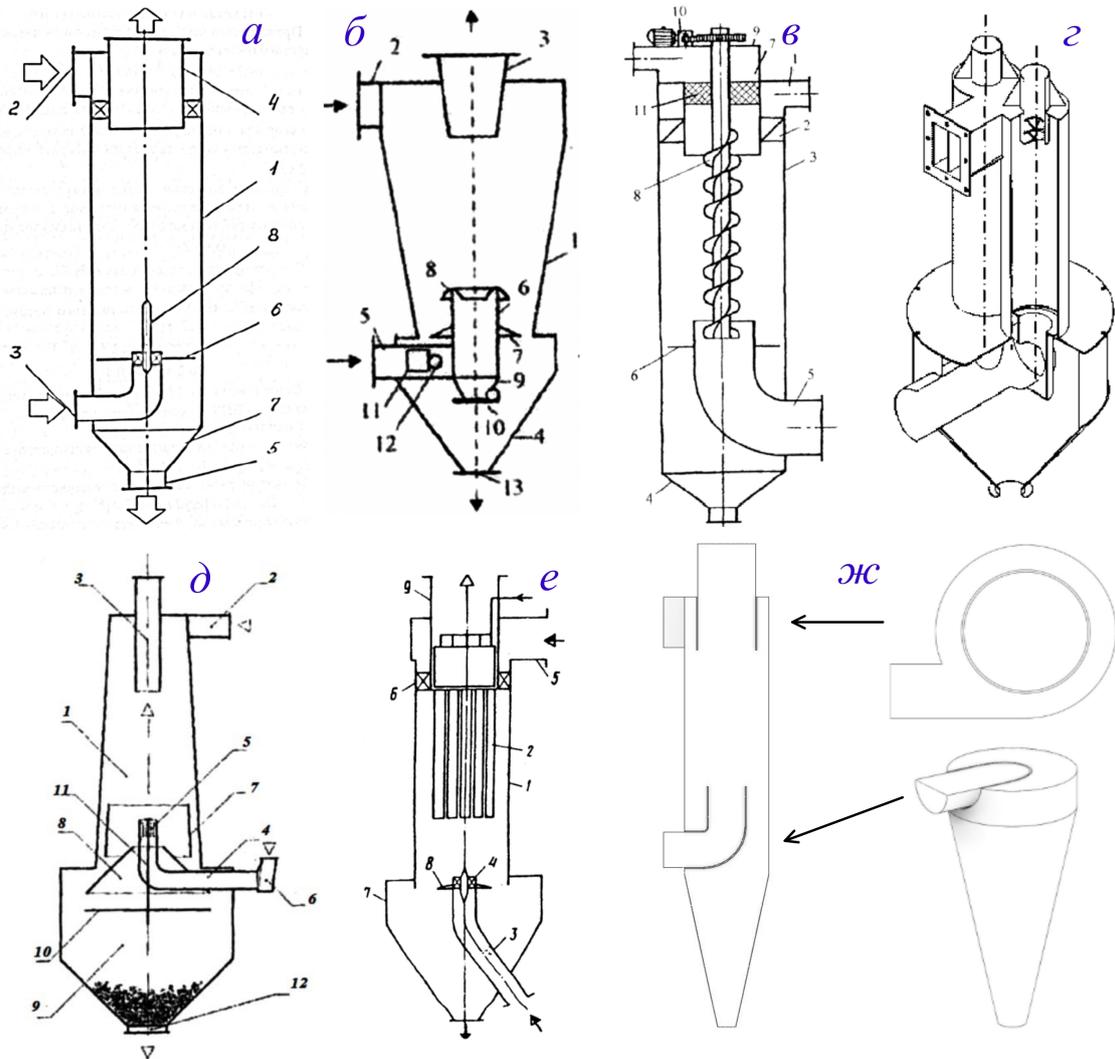


Рис. 7. Примеры конструкций ВЗП: а – [18]; б – [2]; в – [2]; г – [5]; д – [2]; е – нижний патрубок заходит в рабочую камеру из пылевого бункера; ж – проекции вихревого циклона

новка обоих устройств формирует более протяженную зону высоких тангенциальных скоростей.

Изучение эффективности улавливания твердых частиц показывает, что ВЗП имеет преимущества по сепарации мелкодисперсной фракции по сравнению с традиционными циклонами [28; 43; 57].

## 2. Математическое моделирование циклонных пылеуловителей

### 2.1. Модель динамики газа

Газ характеризуется вектором скорости  $\mathbf{u}$ , давлением  $p$ , плотностью  $\rho$ , внутренней энергией  $\epsilon$ , динамической (сдвиговой) вязкостью  $\eta = \rho\nu$  ( $\nu$  – кинематическая вязкость), второй (объемной) динамической вязкостью  $\zeta = \rho\mu$  ( $\mu$  – вторая кинематическая

вязкость). Динамика газа определяется системой уравнений [26]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{W}) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \eta \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_m}{\partial x_m} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \zeta \frac{\partial v_m}{\partial x_m} \right), \quad (2)$$

где коэффициенты вязкости включают турбулентную вязкость:  $\eta = \eta^{(m)} + \eta^{(t)}$ ,  $\zeta = \zeta^{(m)} + \zeta^{(t)}$ . Уравнение Навье–Стокса (2) записано для компонент скорости. Вторая вязкость в задачах моделирования пылеуловителей не учитывается. Молекулярной вязкостью также можно пренебречь в силу  $\eta^{(m)} \ll \eta^{(t)}$  (типичное различие составляет от 4-х до 6-ти порядков). Тензорная форма записи (2) позволяет записать уравнения движения в произвольной системе координат. Традиционным приближением при расчете динамики газа в циклонах является несжимаемость газа, что дает условие

$$\nabla \mathbf{u} = 0. \quad (3)$$

## 2.2. Модели турбулентности

В этом разделе опишем некоторые основные модели турбулентности, которые применяются для моделирования потоков газа внутри различных камер. Необходимо сразу отметить, что трудно однозначно сказать, какая модель является наилучшей, и выбор модели турбулентности является частью исследовательской работы при моделировании таких технических устройств.

Проблема связана с тем, что кинематическая молекулярная вязкость в газе мала и составляет по порядку величины  $\nu^{(m)} \sim c_s \ell^{(mfp)}$ . В силу малости длины свободного пробега молекулы  $\ell^{(mfp)}$ , вязкость воздуха равна примерно  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  и зависит от термодинамического состояния. Численное решение уравнений Навье–Стокса с такой вязкостью, воспроизводящее турбулентность без дополнительных предположений, требует качественных вычислительных алгоритмов, очень подробных сеток, и, как следствие, маленького шага интегрирования по времени. Это необходимо для описания самых мелких (диссипативных) вихрей, обеспечивающих переход макроскопического движения в тепло [37; 51; 119]. Такой способ прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation, DNS) для обсуждаемых в данном обзоре задач практически не применяется. Перечислим некоторые модели турбулентности, применяемые для исследования циклонов, основываясь на пакете COMSOL Multiphysics.

### 2.2.1. Алгебраические модели турбулентности

Для уменьшения требуемых вычислительных ресурсов необходимо усилить действие вязких сил, искусственно увеличить вязкость, рассматривая так называемую турбулентную вязкость  $\nu^{(t)} \gg \nu^{(m)}$ . Один из простых способов задания  $\nu^{(t)}$  может быть основан на модели Буссинеска, в рамках которой каким-либо образом задается турбулентная вязкость и используются уравнения гидродинамики, как для ламинарного потока. Например, по аналогии с молекулярной вязкостью запишем

$$\nu^{(t)} = U^{(t)} \ell^{(t)}, \quad (4)$$

где  $U^{(t)}$  — масштаб скорости,  $\ell^{(t)}$  — шкала турбулентной пульсации. В приближении Прандтля (теория пути смешения Прандтля) [26] можно считать

$$\mathbf{v}^{(t)} = \ell^{(t)2} \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|, \quad (5)$$

где производная вычисляется в направлении, перпендикулярном скорости,  $\ell^{(t)}$  — длина пути смешения, которую необходимо дополнительно определить.

Такие модели называются алгебраическими [27]. Например, одним из вариантов вычисления турбулентной вязкости является следующий. Уравнение (2) запишем в виде:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla (-p \mathbf{e}_n + \mathbf{K}) + \mathbf{F}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{e}_n$  — единичный вектор,

$$\mathbf{K} = (\mu^{(m)} + \mu^{(t)}) (\nabla \mathbf{u} (\nabla \mathbf{u})^T), \quad (7)$$

$$\mu^{(t)} = \mu^{(m)} \left( \left( \frac{df}{d\ell_w^+} \right)^{-1} - 1 \right), \quad (8)$$

$$u^+ = f(\ell_w^+), Re_w = \frac{|\mathbf{u}| \ell_w}{\nu^{(m)}} = u^+ \ell_w^+, \quad (9)$$

$$\ell_w = \frac{\ell_{ref}}{2G}, \quad \nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G (\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4. \quad (10)$$

### 2.2.2. Модель Прандтля – Колмогорова $k-l$

Эта модель предполагает, что  $\mathbf{v}^{(t)}$  можно рассчитать через кинетическую энергию турбулентности (пульсации скорости помечены штрихом)

$$k^{(t)} = \frac{1}{2} \overline{\mathbf{W}^2} = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}), \quad (11)$$

где турбулентные пульсации скорости усредняются. Основой  $k-l$  модели является выражение

$$\mathbf{v}^{(t)} = c_\mu l \sqrt{k^{(t)}}, \quad (12)$$

где  $c_\mu$  — параметр Прандтля – Колмогорова и используется стандартное уравнение на  $k^{(t)}$ .

Определение  $\mathbf{v}^{(t)}$  сводится к дополнительному дифференциальному уравнению в частных производных на кинетическую энергию турбулентности  $k^{(t)}$ . Как вариант, добавляется еще обыкновенное дифференциальное уравнение на  $\ell^{(t)}$ . В настоящее время опубликованы сотни полуэмпирических моделей турбулентности, которые требуют калибровки, и их области применения достаточно ограничены [48].

### 2.2.3. Модель турбулентности $k - \varepsilon$

Турбулентная вязкость определяется через энергию  $k^{(t)}$  и скорость диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon^{(t)}$

$$\nu^{(t)} = c_\mu k^{(t)2} / \varepsilon^{(t)}, \quad (13)$$

которые вычисляются посредством решения уравнений

$$\varrho \frac{\partial k^{(t)}}{\partial t} + \varrho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k^{(t)} = \nabla \cdot \left\{ \left( \mu^{(m)} + \frac{\mu^{(t)}}{\sigma_k} \right) \nabla k^{(t)} \right\} + p_k - \varrho \varepsilon, \quad (14)$$

$$\varrho \frac{\partial \varepsilon^{(t)}}{\partial t} + \varrho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\varepsilon^{(t)} = \nabla \cdot \left\{ \left( \mu^{(m)} + \frac{\mu^{(t)}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon^{(t)} \right\} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon^{(t)}}{k^{(t)}} p_k - C_{\varepsilon 2} \varrho \frac{\varepsilon^{(t)2}}{k^{(t)}} \varrho \varepsilon^{(t)}, \quad (15)$$

где

$$p_k = \mu^{(t)} \left[ \nabla \mathbf{u} : \left( \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right] \quad (16)$$

и  $c_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$  являются эмпирическими константами. К числу недостатков модели  $k - \varepsilon$  относятся некачественное описание течения вблизи стенок и отрыва потока. Имеются проблемы моделирования вихрей и течений с большими градиентами скорости.

### 2.2.4. Модель турбулентности $k - \omega$

Дальнейшим развитием модели  $k - \varepsilon$  является модель турбулентности  $k - \omega$ , в которой рассчитывается удельная скорость диссипации кинетической энергии турбулентности  $\omega$ . Физический смысл величины  $\omega$  связан с характерным временем жизни турбулентного вихря, и это время примерно равно  $1/\omega$ . Турбулентная вязкость равна

$$\nu^{(t)} = k^{(t)} / \omega^{(t)}, \quad (17)$$

$$\varrho \frac{\partial k^{(t)}}{\partial t} + \varrho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k^{(t)} = \nabla \cdot \left\{ \left( \mu^{(m)} + \mu^{(t)} \sigma_k^* \right) \nabla k^{(t)} \right\} + p_k - \beta_0^* \varrho \omega^{(t)} k^{(t)}, \quad (18)$$

$$\varrho \frac{\partial \omega^{(t)}}{\partial t} + \varrho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega^{(t)} = \nabla \cdot \left\{ \left( \mu^{(m)} + \mu^{(t)} \sigma_\omega \right) \nabla \omega^{(t)} \right\} + \alpha \frac{\omega^{(t)}}{k^{(t)}} p_k - \varrho \beta_0^* \omega^{(t)2}. \quad (19)$$

Модель  $k - \omega$  сохраняет некоторые недостатки модели  $k - \varepsilon$ . В частности, расчеты показывают погрешности в образовании вихрей и течений с большими поперечными градиентами скорости. Течения с очень большими числами Рейнольдса дают также заметную ошибку. Однако эта модель лучше работает в пристеночных зонах.

### 2.2.5. Модель Ментнера SST (Shear Stress Transport)

Модель турбулентности SST основана на комбинировании моделей  $k - \varepsilon$  и  $k - \omega$ , область действия которых ограничивается в некоторой окрестности твердых стенок. Модель SST подразумевает наличие ограничителя в выражении для турбулентной вязкости

$$v^{(t)} = \alpha_1 k^{(t)} / \max \left( \alpha_1 \omega^{(t)}, \sqrt{(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) : \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) f_{v2}} \right). \quad (20)$$

Уравнение для кинетической энергии турбулентности имеет вид

$$\varrho \frac{\partial k^{(t)}}{\partial t} + \varrho (\mathbf{u} \cdot \nabla) k^{(t)} = \nabla \cdot \left\{ \left( \mu^{(m)} + \mu^{(t)} \sigma_k \right) \nabla k^{(t)} \right\} + p - \beta_0^* \varrho \omega^{(t)} k^{(t)}. \quad (21)$$

Уравнение для удельной скорости диссипации энергии определяется как

$$\begin{aligned} \varrho \frac{\partial \omega^{(t)}}{\partial t} + \varrho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega^{(t)} = \nabla \cdot \left\{ \left( \mu^{(m)} + \mu^{(t)} \sigma_\omega \right) \nabla \omega^{(t)} \right\} + \frac{\gamma_\omega}{\mu^{(t)}} \varrho p - \varrho \beta \omega^{(t)2} + \\ + 2(1 - f_{v1}) \frac{\sigma_{\omega 2} \varrho}{\omega^{(t)}} \nabla k^{(t)} \cdot \nabla \omega^{(t)}, \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$\ell_w = \frac{1}{G} - \frac{\ell_{ref}}{2}, \quad (23)$$

$$p = \min \left( p_k, 10 \varrho \beta_0^* \omega^{(t)} k^{(t)} \right). \quad (24)$$

Переход между режимами  $k - \varepsilon$  и  $k - \omega$  выполняется на основе функции смешивания  $f_{v1}$ , которая также используется для плавного изменения параметров модели  $\beta, \gamma_\omega, \sigma_k, \sigma_\omega$

$$\Phi = f_{v1} \Phi_1 + (1 - f_{v1}) \Phi_2, \quad (25)$$

где  $\Phi$  — один из параметров  $\beta, \gamma_\omega, \sigma_k, \sigma_\omega$ .

### 2.2.6. Модель Дурбина ( $v^2 - f$ )

В модели Дурбина параметр турбулентной вязкости вычисляется как

$$v^{(t)} = C_\mu k^{(t)} \zeta^{(t)} \tau, \quad (26)$$

где для вычисления кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации решаются уравнения

$$\varrho \frac{\partial k^{(t)}}{\partial t} + \varrho (\mathbf{u} \cdot \nabla) k^{(t)} = \nabla \cdot \left\{ \left( \mu^{(m)} + \frac{\mu^{(t)}}{\sigma_k} \right) \nabla k^{(t)} \right\} + p_k - \varrho \varepsilon^{(t)}, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \varrho \frac{\partial \varepsilon^{(t)}}{\partial t} + \varrho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \varepsilon^{(t)} = \nabla \cdot \left\{ \left( \mu^{(m)} + \frac{\mu^{(t)}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon^{(t)} \right\} + \frac{1}{\tau} \left( C'_{\varepsilon 1} \left( \zeta^{(t)}, \alpha \right) p_k - \right. \\ \left. - C'_{\varepsilon 2} \left( k^{(t)}, \varepsilon^{(t)}, \alpha \right) \varrho \varepsilon^{(t)} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

Также система дополняется уравнением на масштаб скорости  $\zeta^{(t)}$  и величину  $\alpha$

$$\begin{aligned} \varrho \frac{\partial \zeta^{(t)}}{\partial t} + \varrho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \zeta^{(t)} = \nabla \cdot \left\{ \left( \mu^{(m)} + \frac{\mu^{(t)}}{\sigma_\zeta} \right) \nabla \zeta^{(t)} \right\} + \\ + \frac{2}{k^{(t)}} \left( \alpha^3 \mu^{(m)} + \frac{\mu^{(t)}}{\sigma_k} \right) \nabla k^{(t)} \cdot \nabla \zeta^{(t)} + (1 - \alpha^3) f_w + \alpha^3 f_h - \zeta^{(t)} \frac{p_k}{k^{(t)}}, \end{aligned} \quad (29)$$

$$\alpha - L^2 \nabla^2 \alpha = 1, \quad (30)$$

где

$$f_w = -\zeta \frac{\varepsilon^{(t)}}{k^{(t)}}, f_h = -\frac{1}{\tau} \left( C_1 - 1 + C_2 \frac{p_k}{\varrho \varepsilon^{(t)}} \right) \left( \zeta^{(t)} - \frac{2}{3} \right). \quad (31)$$

Масштаб длины  $L$  и времени  $\tau$  определяются как

$$L = C_L \max \left[ \left( \frac{k^{(t)3}}{\varepsilon^2} \right)^{1/2}, C_\eta \left( \frac{\nu^{(t)3}}{\varepsilon} \right)^{1/4} \right], \quad (32)$$

$$\tau = \max \left[ \frac{k^{(t)}}{\varepsilon^{(t)}}, C_\tau \sqrt{\frac{\nu^{(t)}}{\varepsilon^{(t)}}} \right]. \quad (33)$$

### 2.2.7. Large Eddy Simulations (LES)

Модель турбулентности LES предполагает прямое моделирование наиболее крупных вихрей и использование подсеточных моделей для описания мелких вихрей. В качестве подсеточных моделей используются алгебраические модели. Неплохие результаты получаются в модели LES с динамической подсеточной шкалой Smagorinsky-Lilly [100]. Отметим также исследование [87], в котором используется гибридная модель Elliptic Relaxation Hybrid RANS/LES (ER-HRL), объединяющая усредненные уравнения Рейнольдса и метод крупных вихрей (LES).

### 2.3. Модель динамики аэрозолей

Для изучения движения частиц используют уравнения Ньютона, либо приближение сплошной среды [56; 74], например, в диффузионном приближении [115]. Достаточно крупные частицы предпочтительно описывать уравнениями движения [122]

$$\frac{d^2 \mathbf{r}^{(p)}}{dt^2} = A^{(p)} (\mathbf{u} - \mathbf{u}^{(p)}) + \frac{\varrho^{(p)} - \varrho}{\varrho^{(p)}} \mathbf{g} + \mathbf{f}^{(a)}, \quad \frac{d \mathbf{r}^{(p)}}{dt} = \mathbf{u}^{(p)}, \quad (34)$$

где  $\mathbf{r}^{(p)}(t)$  и  $\mathbf{u}^{(p)}(t)$  — радиус-вектор и скорость частицы соответственно,  $\varrho^{(p)}$  — плотность пылинки,  $\varrho(\mathbf{r}, t)$  — локальная плотность газа,  $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$  — скорость газа,  $\mathbf{f}^{(a)}$  — дополнительная удельная сила, действующая на частицу (например, электростатическая сила). Параметр

$$A^{(p)} = \frac{18 \nu}{d^{(p)2}} \frac{\varrho}{\varrho^{(p)}} \frac{C_D Re^{(p)}}{24} \quad (35)$$

зависит от числа Рейнольдса для частицы

$$Re^{(p)} = \frac{d^{(p)} |\mathbf{u}^{(p)} - \mathbf{u}|}{\nu} \quad (36)$$

и коэффициента сопротивления (Drag Coefficient) [122]

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re^{(p)}}, & Re^{(p)} \leq 1, \\ \frac{24}{Re^{(p)}} \left( 1 + 0,15 \left( Re^{(p)} \right)^{0,687} \right), & 1 < Re^{(p)} \leq 1000, \\ 0,43829, & Re^{(p)} > 1000. \end{cases} \quad (37)$$

Выражение (37) учитывает сложную зависимость силы сопротивления от скорости. Используются и другие близкие выражения [114]

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re^{(p)}}, & Re^{(p)} \leq 1, \\ \frac{24}{Re^{(p)}} \left( 1 + \frac{1}{6} \left( Re^{(p)} \right)^{2/3} \right), & 1 < Re^{(p)} \leq 400. \end{cases} \quad (38)$$

Необходимо помнить, что число Рейнольдса для частицы определяется в системе отсчета потока газа (36). Даже для крупных пылинок с  $d^{(p)} = 100$  мкм имеем  $|\mathbf{u}^{(p)} - \mathbf{u}| \leq 60$  м/с для условия  $Re^{(p)} = 400$ . Указанное ограничение на разность скоростей выполняется всегда с большим запасом.

Имея поле скоростей газа, можно рассчитать траектории движения набора частиц с разными плотностями, размерами и начальными положениями в входном патрубке. Если фиксировать частицы, которые уходят вместе с газом через выходную границу, то можно рассчитать эффективность улавливания твердой фракции  $\Upsilon$ , для которой  $0 \leq \Upsilon \leq 1$ , либо вычислять ее в процентах.

#### 2.4. Двухфазная модель

Для частиц малых размеров можно использовать модели, в которых пылевая фаза описывается уравнениями сплошной среды. Особое значение многофазные модели имеют для газа и пыли при высоких температурах, что влияет на динамику обеих компонент. Уравнения динамики двухфазной сплошной среды определяются следующей системой уравнений [74; 98]

$$\frac{\partial f_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0, \quad (39)$$

$$\frac{\partial f_s \rho_s}{\partial t} + \nabla \cdot (f_s \rho_s \mathbf{v}_s) = 0. \quad (40)$$

Закон сохранения массы записывается через уравнения непрерывности для каждой из фаз с содержанием  $f_g$  и  $f_s$ . Законы сохранения импульса для каждой из компонент определяются уравнениями

$$\frac{\partial f_g \rho_g \mathbf{v}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -f_g \nabla \cdot (\mathbf{T}_g^{ef}) + f_g \rho_g \mathbf{g} - \nabla p + \mathbf{F}_{res}, \quad (41)$$

$$\frac{\partial f_s \rho_s \mathbf{v}_s}{\partial t} + \nabla \cdot (f_s \rho_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = f_s \rho_s \mathbf{g} - \mathbf{F}_{\text{res}}, \quad (42)$$

где индексом «g» обозначаем газовую фазу и индексом «s» пылевую фазу,  $\mathbf{F}_{\text{res}}$  — силы сопротивления между фазами. Закон сохранения энергии учитывает перенос тепловой энергии и определяет динамику температуры фазы

$$\frac{\partial f_g \rho_g C_{pg} T_g}{\partial t} + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g C_{pg} T_g) = -f_g \nabla \cdot (\mathbf{q}_g^{ef}) - f_g \mathbf{q}_{gs}, \quad (43)$$

$$\frac{\partial f_s \rho_s C_{ps} T_s}{\partial t} + \nabla \cdot (f_s \rho_s \mathbf{v}_s C_{ps} T_s) = f_s \mathbf{q}_{gs}, \quad (44)$$

где  $\mathbf{q}_{gs}$  — скорость теплопередачи между фазами.

К приведенным выше уравнениям необходимо добавить еще какую-либо модель турбулентности. Учет теплового уравнения для газа (43) в циклонах рассматривался в [114].

Такой подход имеет преимущества для моделирования горячего запыленного газа в циклонах или других пылеуловителях для задач цементной промышленности, металлургии и т. п.

## 2.5. Программные пакеты для моделирования

Целый ряд коммерческих систем вычислительной гидродинамики позволяет моделировать процессы в пылеуловителях. К ним можно отнести Ansys Fluent CFD solver [6; 60; 70; 103; 105; 111], ANSYS CFX [79], FlowVision [41], SolidWorks Flow Simulation [18; 40], COMSOL Multiphysics [104]. Эти программные пакеты для численного интегрирования уравнений гидродинамики используют метод конечных элементов и содержат большой набор моделей турбулентности. Отечественный программный комплекс FlowVision является разработкой компании ТЕСИС [34; 88].

Отдельным программным обеспечением является OpenFOAM, которое позиционируется в качестве платформы для численного моделирования, в том числе динамики турбулентного газа. Свободно распространяемый пакет OpenFOAM содержит набор библиотек на языке C++ [11; 102]. Достоинством OpenFOAM представляется наличие интеграции с САПР FreeCAD, платформой для численного моделирования SALOME, инструментом для визуализации многомерных данных ParaView [15]. Укажем также на проект T-flows<sup>2</sup>, предоставляющий открытый код для вычислительной гидродинамики.

Отметим также приближенные эмпирические модели, позволяющие получать некоторые инженерные оценки зависимостей между основными параметрами работы циклонов. Такие формулы можно найти в работах [69–71; 75; 77; 91; 116].

Пакеты Ansys Fluent, SolidWorks Flow Simulation, COMSOL Multiphysics имеют внутренние либо интегрированные инструменты для генерации различных сеток в зависимости от решаемой задачи. Отметим Fluent Meshing Workflow, Ansys Meshing в случае Ansys Fluent, где можно использовать тетраэдрические, полиэдрические, гексаэдрические сетки и их комбинации. Генерация адаптивной сетки в SolidWorks Flow Simulation автоматически учитывает как геометрию твердых поверхностей, так и характеристики потока (наличие больших локальных градиентов). В пакете COMSOL Multiphysics применяется метод конечных элементов для построения сеток. В системе FlowVision используется структурированная, локально-адаптивная декартова сетка, размеры элементов которой можно подстраивать под геометрию тела.

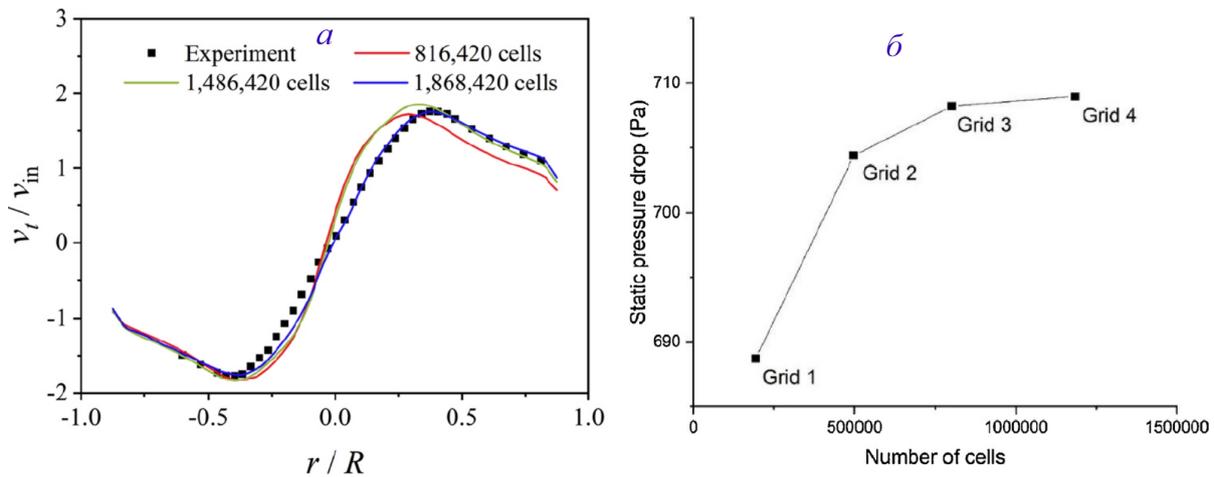


Рис. 8. *а* — тангенциальная скорость в сечении циклона на высоте  $z/D = 2$  по результатам измерений (квадратики) и численного моделирования с разным числом ячеек (цветные линии) [111]; *б* — Падение давления для четырех сеток с различным числом ячеек [96]

Рисунок 8 показывает чувствительность результатов моделирования по отношению к выбору сетки, которую можно характеризовать числом элементов (ячеек), размером минимальной ( $\Delta \ell_{\min}^g$ ) и максимальной ( $\Delta \ell_{\max}^g$ ) ячейки. Наш анализ многочисленных работ показывает, что радиальные профили тангенциальной (скорость вращения газа) и аксиальной (вдоль оси симметрии циклона) компонент скорости являются самым надежным маркером для выбора как численной сетки, так и модели турбулентности. Панель *б* дает представление о сходимости падения давления  $\Delta P^{(h)}$  (между входом и выходом) при увеличении разрешения вычислительной сетки. Расчеты с  $N^{(g)} = 193\,509$  (Grid 1,  $\Delta \ell_{\max}^{(g)} = 12$  мм) и  $N^{(g)} = 1\,183\,928$  (Grid 4,  $\Delta \ell_{\max}^{(g)} = 6$  мм) различаются по падению давления в циклоне на 3 процента.

### 3. Моделирование динамики газа и пылевой компоненты

#### 3.1. Общая структура течения

Структура течения внутри циклона Stairmand показана на рисунке 9. Хорошо виден глобальный вихрь, охватывающий всю рабочую камеру, включая бункер для пыли внизу и трубу выходного канала вверх. Максимальная тангенциальная скорость находится ближе к оси аппарата. Поле скоростей показано векторами и на врезках хорошо видны мелкие вихри почти во всей камере, за исключением внешней части бункера для пыли и внешней части вверх циклона за пределами выходного патрубка. Используемая модель турбулентности RSM обеспечивает описание анизотропных пульсаций в потоке, так что наблюдаемые размеры вихрей примерно равны  $0,1D$ .

Авторы в [80] использовали модель турбулентности LES. Рисунок 10 показывает, как изменяется распределение тангенциальной скорости при различных скоростях входа запыленного газа (здесь вращение газа происходит по часовой стрелке, поэтому скорости отрицательны). Распределение аксиальной скорости на рисунке 11 является отражением глобального вращения и двух вертикальных движений. Внешняя часть основного вихря медленно движется вниз по спирали с типичными максимальными аксиальными скоростями в пределах  $\frac{2}{5}U^{(in)}$ .

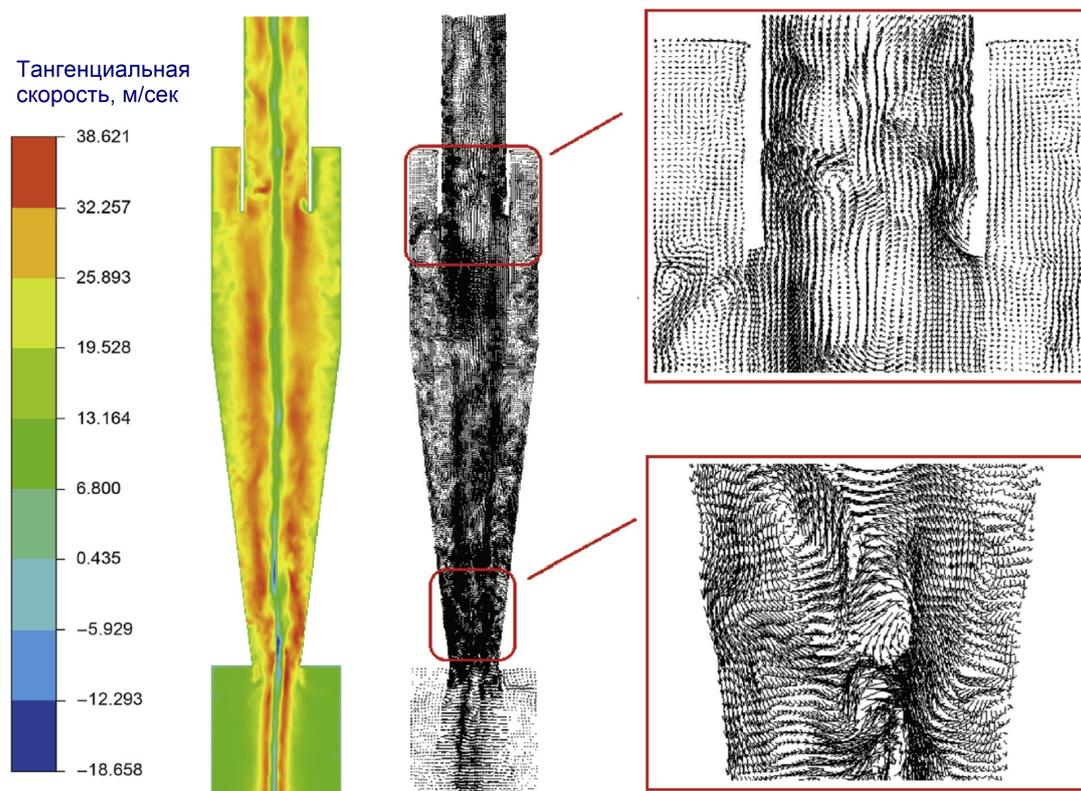


Рис. 9. Тангенциальная скорость и поле скоростей в обратном циклонном сепараторе Stairmand с одним тангенциальным входным отверстием [105]

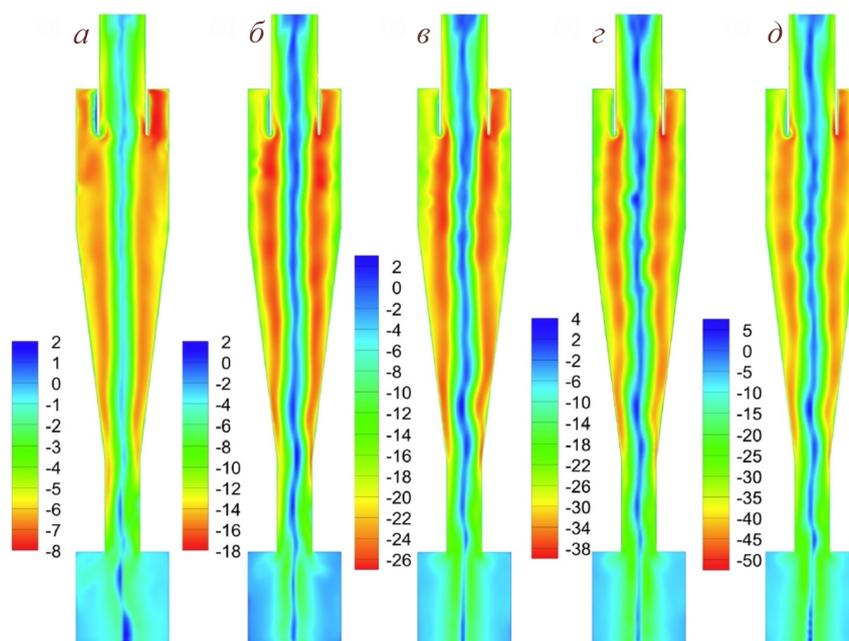


Рис. 10. Распределение тангенциальных скоростей в сечении циклона при различных значениях скорости втекания газа: а — 5 м/с, б — 10 м/с, в — 15 м/с, г — 20 м/с, д — 25 м/с [80]

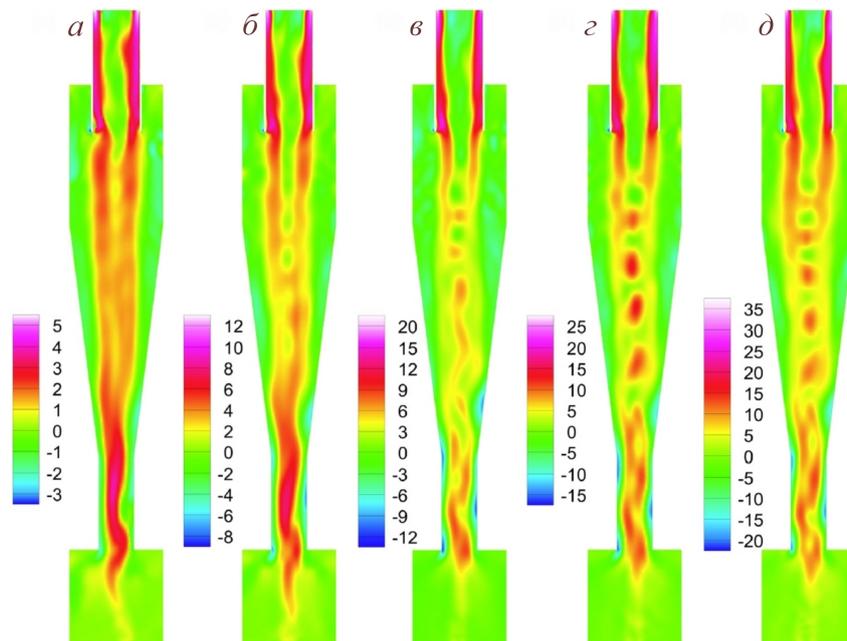


Рис. 11. Распределение аксиальных скоростей в сечении циклона при различных значениях скорости втекания газа: *a* — 5 м/с, *б* — 10 м/с, *в* — 15 м/с, *г* — 20 м/с, *д* — 25 м/с [80]

Движение вверх в узкой приосевой зоне в целом происходит быстрее, особенно в нижней области конусообразной части и выходном канале. Вверху конусообразной части и в цилиндрической камере наблюдается последовательность характерных сильно неоднородных структур аксиальной скорости размером около  $0,3D$ . В этих пределах скорость меняется на 2–10 м/с в зависимости от величины  $U^{(in)}$ .

Скорость потока  $U^{(in)}$  является одним из важнейших параметров, влияющих на результат работы циклонов [70]. В качестве другой эквивалентной характеристики выступает расход газа  $Q^{(in)} = U^{(in)}S^{(in)}$  (л/с или м<sup>3</sup>/с), где  $S^{(in)}$  — площадь входного патрубка, через который газ поступает в циклон.

Отметим, что в случае сильно запыленного газа с высоким содержанием пыли твердая фракция может влиять на динамику газа в циклоне. Этот фактор является существенным в некоторых случаях, поскольку плотность частицы значительно превышает плотность газа при нормальных условиях  $\rho^{(p)}/\rho^{(g)} > 10^3$ . Однако систематический анализ самосогласованного движения двух фракций в пылеуловителях не проводился. Прежде всего это связано со сложностью выбора модели турбулентности и ее калибровкой.

### 3.2. Гидродинамические числа подобия

В работе [99] был проведен анализ течений внутри циклона Стайрмана (Stairmand cyclone) в широчайшем интервале числа Рейнольдса  $Re = 84 - 252\,876$ . Авторы рассчитали в рамках вычислительных экспериментов пять критических чисел Рейнольдса, соответствующих переходам между различными режимами. Число Рейнольдса  $Re_{in}$  определяется на входе в аппарат [99]

$$Re_{in} = U_{in}d_{in}/\nu, \tag{45}$$

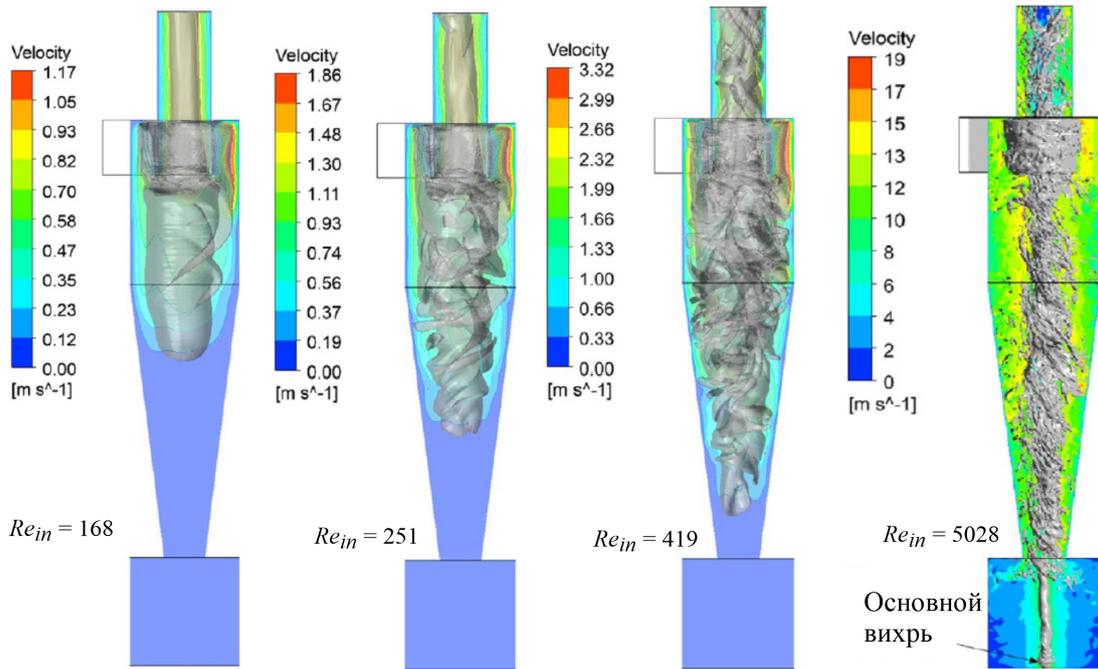


Рис. 12. Поле скорости и вихревая структура при различных числах Рейнольдса [99]

где  $U_{in}$  — средняя скорость во входном канале диаметром  $d_{in}$ . Число Рейнольдса характеризует соотношение между вязкой силой и силами инерции, тем самым определяет потерю гидродинамической устойчивости и переход от ламинарного потока к турбулентному.

Ниже перечислим критические значения  $Re_{in}$ , при которых происходит переход к другому режиму течения в циклоне по работе [99]:

- 1) Ламинарный поток при  $Re_{in} < Re_{in}^{(cr1)} = 200$ .
- 2) Переходной режим от ламинарного течения,  $Re_{in}^{(cr1)} < Re_{in} < Re_{in}^{(cr2)} = 500$ .
- 3) Переходной режим к турбулентности,  $Re_{in}^{(cr2)} < Re_{in} < Re_{in}^{(cr3)} = 1\ 050$ .
- 4) Первый турбулентный субрежим,  $Re_{in}^{(cr3)} < Re_{in} < Re_{in}^{(cr4)} = 5\ 000$ .
- 5) Второй турбулентный субрежим,  $Re_{in}^{(cr4)} < Re_{in} < Re_{in}^{(cr5)} = 100\ 000$ .
- 6) Третий турбулентный субрежим,  $Re_{in}^{(cr5)} < Re_{in}$ .

Рисунок 12 показывает скорости и область вихревого ядра для разных значений  $Re_{in}$ . Вихревое ядро выделено серым цветом и соответствует малым значениям вихревого напряжения в газовом потоке.

Важной безразмерной характеристикой потока является число Эйлера  $Eu$ , определяемое отношением падения давления на участке к удельной кинетической энергии

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho u_{eff}^2 / 2}. \tag{46}$$

Число Стокса определяется через параметры газа и твердых частиц

$$St = \frac{\rho^{(p)} d^{(p)2} U^{(in)}}{18 \rho^{(g)} \nu D}. \tag{47}$$

Это число является безразмерным диаметром частицы с учетом свойств потока, в котором движется эта частица. В работе [76] по результатам вычислительных экспериментов проведен анализ влияния значений  $St$  и  $Eu$  на характеристики работы циклона.

### 3.3. Падение давления в аппаратах

Разность давлений газа на входе ( $P^{(In)}$ ) и выходе ( $P^{(Out)}$ )  $\Delta P^{(c)} = P^{(In)} - P^{(Out)}$  является одной из ключевых характеристик аппарата, поскольку определяет гидравлическое сопротивление потоку и энергетические затраты [1; 31]. Величина  $\Delta P^{(c)}$  складывается прежде всего из следующих четырех факторов [100]:

- 1) Потери энергии в зоне входа газового потока.
- 2) Потери в кольцевом пространстве между корпусом циклона и выходным патрубком.
- 3) Потери в основном корпусе циклона ниже выходного патрубка.
- 4) Потери при движении газа в выходном патрубке.

Традиционно выделяют гидравлические потери в потоке из-за трения о стенки и внутреннего трения, имеющиеся даже в прямой трубе для однородного и стационарного потока. Такие потери можно характеризовать падением давления  $\Delta P^{(h1)}$ . Например, для течения Пуазейля в круглой трубе уравнение Навье–Стокса в цилиндрической системе координат для однородного стационарного потока дает

$$0 = -\frac{dp}{dr} + \rho \frac{\nu}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{du}{dr} \right), \quad (48)$$

где  $r$  — радиальная координата. Граничные условия на концах трубы заданы фиксированными давлениями  $p(z = 0) = p_1$ ,  $p(z = L) = p_2$ , и на поверхности трубы радиусом  $R$  имеем условие прилипания  $u(r = R) = 0$ . Интегрирование (48) приводит к профилю скорости

$$u(r) = \frac{\Delta P^{(h)}}{4\eta L} (R^2 - r^2). \quad (49)$$

Это дает линейную зависимость между падением давления и некоторой средней скоростью  $\Delta P^{(h1)} \propto u_{av}$ . Шероховатость твердых поверхностей дает дополнительный вклад в зависимости от горизонтальной шкалы неровностей  $\delta \ell^{(r)}$  и характерной высоты  $\delta h^{(r)}$ . Пыль способствует изменчивости  $\delta \ell^{(r)}$  и  $\delta h^{(r)}$  со временем.

Любые локальные неоднородности твердых поверхностей в области потока создают дополнительное гидравлическое сопротивление. В итоге имеем квадратичную зависимость  $\Delta P^{(h1)} \propto u_{av}^2$ . Другими факторами, усиливающими гидравлическое сопротивление, являются неоднородность и нестационарность потока, вклад которого равен  $\Delta P^{(h2)}$ . Полное гидравлическое сопротивление устройства определяется разностью давлений на входе и выходе  $\Delta P^{(h)} = \Delta P^{(h1)} + \Delta P^{(h2)}$ . Величина  $\Delta P^{(h)}$  прежде всего определяет эксплуатационные затраты на очистку. С ростом  $\Delta P^{(h)}$  можно ожидать увеличение эффективности очистки и увеличение расходов на эксплуатацию.

В работе [76] исследовано влияние внутренних перегородок и шероховатости поверхности рабочей камеры на эффективность сепарации газа. Численные модели показывают, что указанные факторы повышают эффективность улавливания пыли, особенно диаметром менее 2 мкм.

Рисунок 13 дает типичное представление о характере распределения давления внутри циклона. Вблизи стенок рабочей камеры имеем повышенное давление. В зоне оси симметрии, где располагается восходящий поток газа, давление является пониженным.

Рисунок 14 сравнивает зависимости  $\Delta P^{(c)}(U^{(in)})$  в различных моделях с данными измерений. Наилучший результат среди численных моделей турбулентности показывает RSM. Некоторые эмпирические зависимости (Casal-Martinez, Stairmand) могут давать

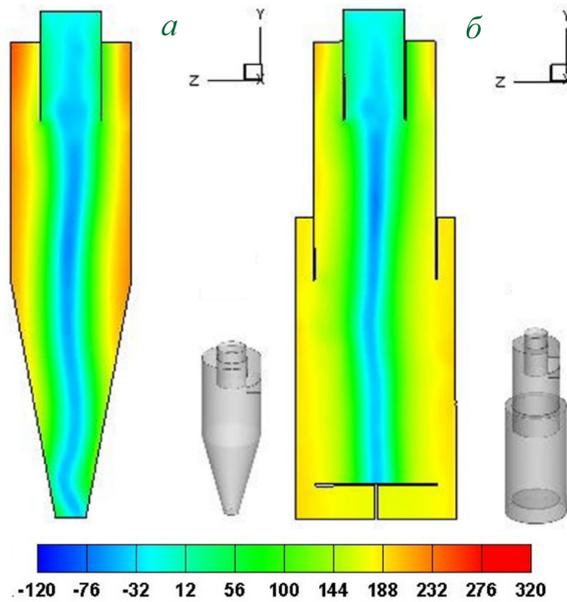


Рис. 13. Распределение давления  $p - p_0$  (Па) для двух конструкций циклонов [114]

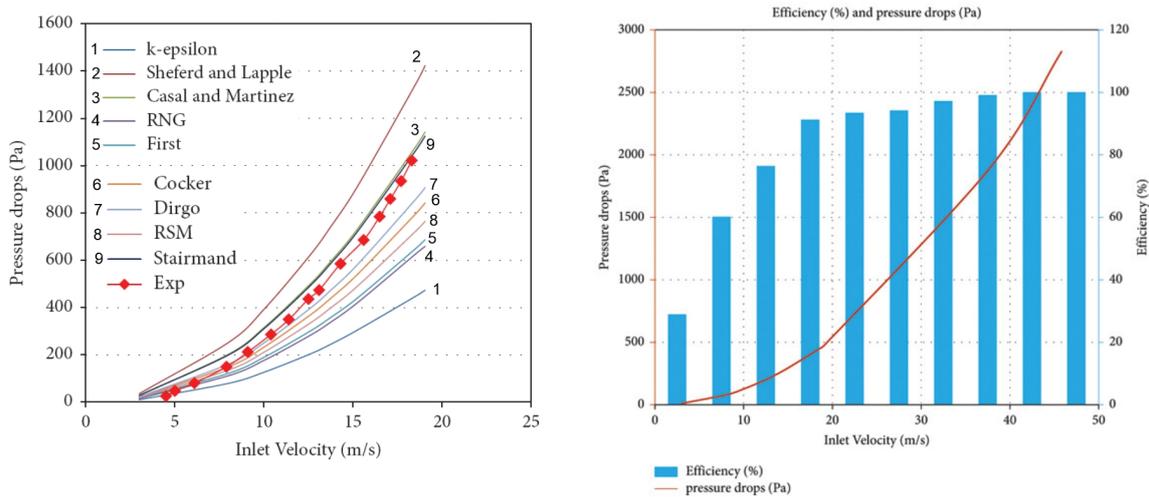


Рис. 14. Зависимости падения давления (Pressure drops) и эффективности очистки (Efficiency) от скорости во входном патрубке (Inlet velocity) для различных моделей в работе [70]

более близкий результат к экспериментальным данным, однако они должны подгоняться при изменении конструкции. Связь  $\Delta P^{(c)}(U^{(in)})$  можно считать степенной с показателем 2 на широком интервале от 3 до 50 м/с.

Гидравлическое сопротивление рассматриваемых аппаратов удобно характеризовать величиной

$$\Delta P^{(h)} = \xi^{(HR)} \frac{\rho W^{(av)2}}{2}, \tag{50}$$

где  $W^{(av)}$  — характерная скорость потока в пылеуловителе,  $\xi^{(HR)}$  — коэффициент гидравлического сопротивления аппарата. Необходимо подчеркнуть, что нет однозначного определения величины  $W^{(av)}$ . Коэффициент  $\xi^{(HR)}$  определяется либо экспериментально, либо с использованием верифицированных численных моделей. Разная зависимость  $\Delta P^{(h)}$  от характерной скорости потока указывает, что основной вклад обусловлен неод-

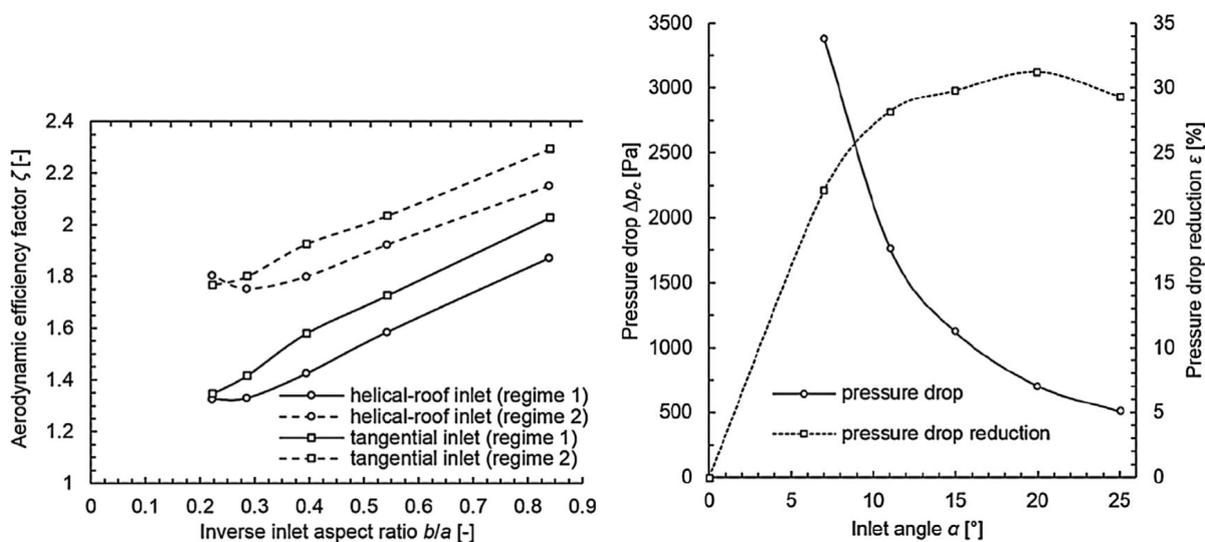


Рис. 15. Коэффициент аэродинамической эффективности (а) и падение давления (б) пылеуловителей с различной конструкцией входного патрубка [100]

нородностью потока.

Величину  $\xi^{(HR)}$  называют также коэффициентом аэродинамической эффективности [100] и этот параметр можно использовать для сравнения аппаратов разных конструкций [67]. Величина  $\xi^{(HR)}$  меняется в широких пределах у разных аппаратов. Промышленные образцы циклонов выпуска 50 лет назад уже давали  $\xi^{(HR)} = 14-18$  [67].

### 3.4. Влияние геометрии циклонного пылеуловителя на течение газа

#### 3.4.1. Входной поток газа

Условия, при которых газ поступает в рабочую камеру, существенно влияют на структуру газового потока и процесс сепарации твердой фракции [81; 100]. Загрязненный газ поступает в рабочую камеру через входной патрубок. Поэтому геометрия всего входного узла прежде всего формирует циклоническое движение газо-пылевой смеси. В работе [81] изучено влияние угла  $\Theta_{in}$  между входным патрубком и горизонтальной плоскостью (см. рис. 16). Варьирование этого угла приводит к формированию различающейся вихревой структуры, что сказывается на времени пребывания пылевой частицы в рабочей камере и эффективность очистки (см. рис. 16e). Расчеты показывают, что потоки с  $\Theta_{in} < 0$  снижают эффективность сепарации. Разница между конструкциями с  $\Theta_{in} = 0 - 30^\circ$  дает слабое отличие [81].

Стандартным является тангенциальный вход с  $\Theta_{in} = 0^\circ$  (см. рис. 16b), для которого может варьироваться высота входного канала  $a_{in}$  (см. рис. 17a). Более сложные конструктивные изменения для входа рассмотрены авторами [100] в виде винтового входа с углом  $\alpha_{in}$ . Вычисления дают результат, показанный на рисунке 17z. Сравнение моделей с винтовым и тангенциальным входными патрубками рассмотрено при различных отношениях высоты и ширины входа  $b/a_{in}$  (см. рис. 17a, z). Эти модели дают существенно различающиеся распределения тангенциальной скорости (см. рис. 18a). Тангенциальный вход дает более высокую скорость вращения в основной части вихря. Влияние рассматриваемых конструкций на аксиальную скорость является более сложным и нелинейным (рис. 18б).

Предлагаются более изысканные конструкции для втекающего газа с использованием винтовых направляющих лопаток [82]. Модификации различаются числом оборотов направляющих лопаток  $n^{(turn)}$  (см. рис. 19)

Конструкции на рисунке 19 позволяют усиливать вихревое движение. Увеличение тангенциальной скорости с ростом числа оборотов направляющих  $n^{(turn)}$  во входном канале способствует увеличению падения давления. Увеличение  $n^{(turn)}$  повышает эффективность сепарации. Авторы [82] исследовали такой циклон прежде всего для очистки от капель нефти в технологическом процессе на морских буровых платформах. Увеличение площади твердой поверхности улучшает условия для формирования нефтяной пленки и последующего захвата наиболее маленьких капель.

В работе [110] рассмотрена конструкция с винтовым входом в его предельном случае. На рисунке 20а показана конструкция циклона с винтовой (шнековой) направляющей внутри корпуса. Авторы рассчитали эффективность очистки газа при скорости  $U^{(in)} = 18$  м/с для трех модификаций шнековой направляющей: 1 — без шнека (черная линия), 2 — шнековый циклон с равномерным шагом шнека (синяя линия), 3 — шнековый циклон с переменным шагом шнека (красная линия) (рис. 20б). Получено, что частицы с  $d^{(p)} > 3$  мкм улавливаются практически полностью, а эффективность для частиц с размером 1 мкм достигает 80 %.

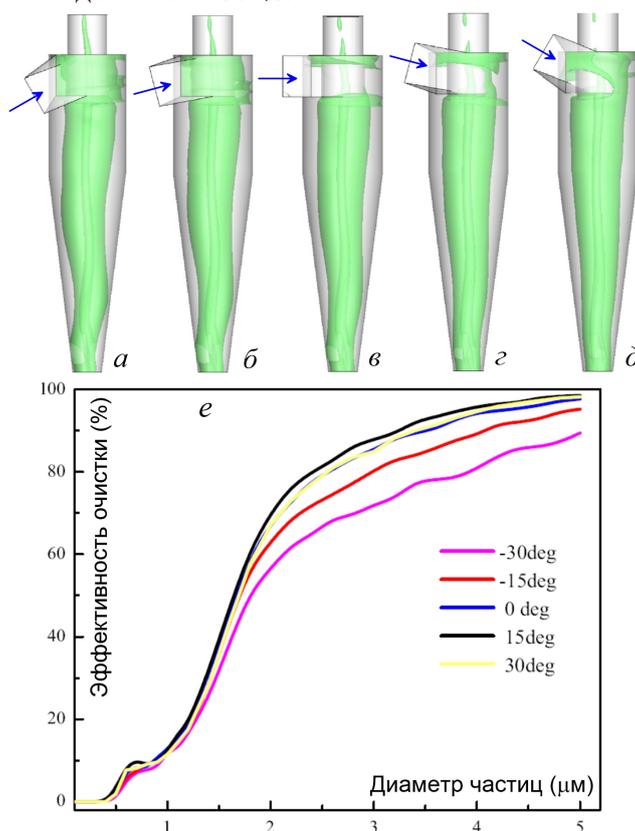


Рис. 16. Циклоны с различным углом входа газового потока  $\Theta_{in}$  (а —  $\Theta_{in} = -30^\circ$ , б —  $\Theta_{in} = -15^\circ$ , в —  $\Theta_{in} = 0^\circ$ , г —  $\Theta_{in} = 15^\circ$ , д —  $\Theta_{in} = 30^\circ$ ) [81]. Цветом показана поверхность нулевой скорости вдоль оси. е — эффективность очистки газа для различных размеров частиц при различных углах  $\Theta_{in}$

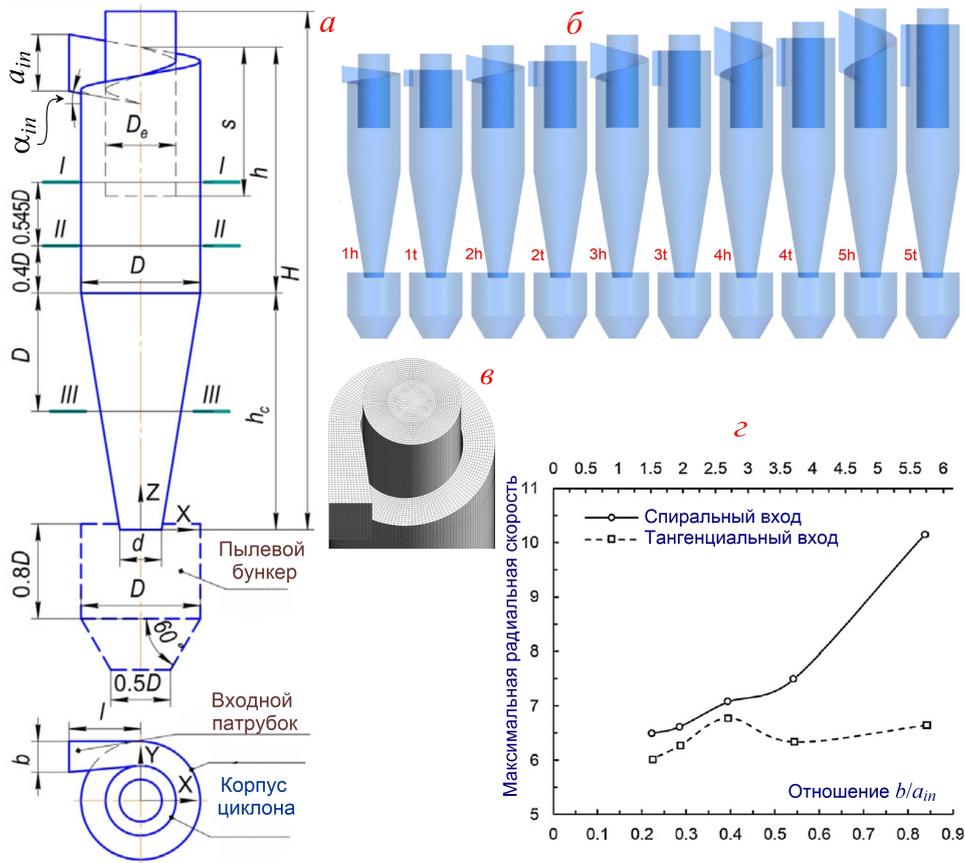


Рис. 17. *а* — конструкция и геометрические характеристики циклона с винтовым входом потока [100]; *б* — геометрия последовательности исследованных конструкций с различным входом газа (красным отмечены шифры конструкций); *в* — геометрия винтового входа; *г* — максимальная безразмерная радиальная скорость в рабочей камере от отношения  $b/a_{in}$  для спирального и тангенциального входов

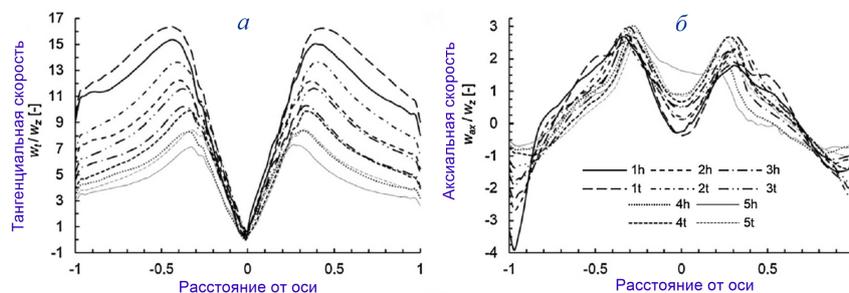


Рис. 18. Радиальные профили тангенциальной (*а*) и аксиальной (*б*) скоростей для 10 моделей (1h-5t, см. рис. 17б) для среза II–II в цилиндрической части корпуса циклона [100]

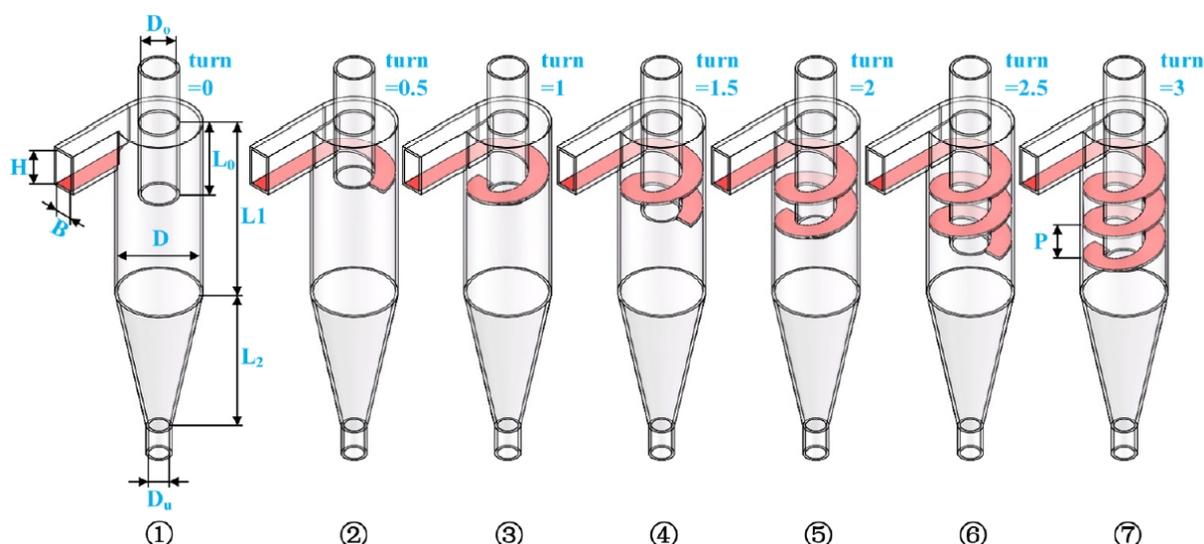


Рис. 19. Конструкция циклонов из работы [82]

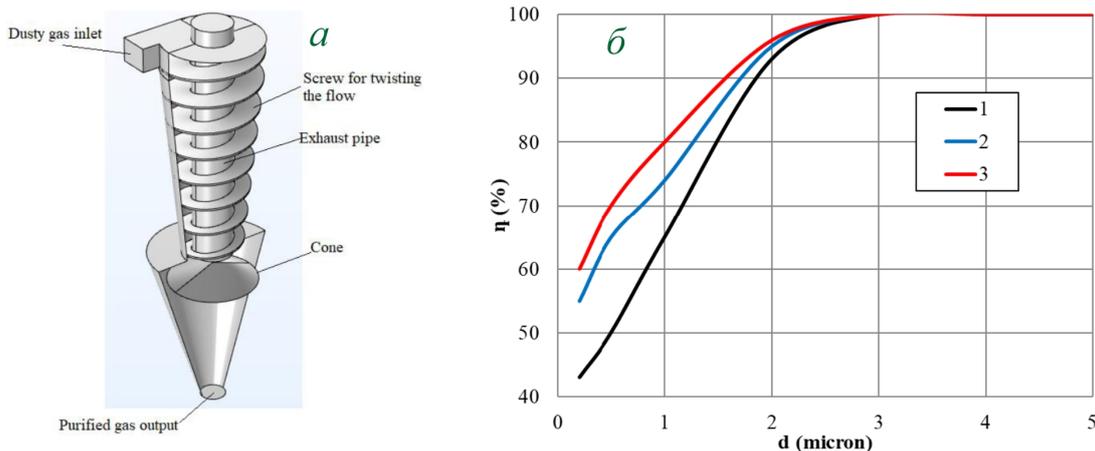


Рис. 20. а — конструкция циклона из работы [110]; б — эффективность циклона [110]

### 3.4.2. Циклоны с несколькими входными патрубками

Проведены исследования для циклонных пылеуловителей с несколькими входными потоками с целью определить их производительность по сравнению с классическим аппаратом с одним входным каналом [96; 124]. Переход от одного входа к двум создает более симметричную структуру вращающегося газа и может улучшить производительность (см. рис. 21). Отметим, что эти циклоны не относятся к типу ВЗП, поскольку все входные каналы обеспечивают исходный угловой момент вращения газа для нисходящего потока.

Несколько входных патрубков могут обеспечить более эффективный режим очистки для некоторых прикладных задач [96; 113] (рис. 21). В частности, изучено несколько конструкций входа для четырех каналов (рис. 21в,г). Рассмотрены как четыре канала на одной высоте по вертикальной координате, так и четыре входа на разной высоте. Отметим, что такие модификации не приводят к качественно различающимся результатам, хотя и влияют на пространственные распределения физических параметров и эффективность очистки.

В работе [124] сравнивалась экспериментальная структура течений для циклона с одним тангенциальным входом (стандартная конструкция) и с двумя входными патрубками (см. рис. 22). Для фиксированной входной скорости  $U^{(in)} = 20,18$  м/с профили тангенциальной скорости  $u_{\varphi}(r)$  в рабочей камере оказываются в среднем меньше для циклона с двумя входными каналами, чем с одним. Только вблизи оси  $r/R \leq 0.2$  различие практически исчезает.

Распределение тангенциальной компоненты скорости вдоль радиуса  $r$  от оси симметрии внутри циклона можно разделить на две части

$$u_{\varphi} = \begin{cases} k_{v1}r, & 0 \leq r \leq r^{(v)}, \\ k_{v2}r^{-n_v}, & r^{(v)} \leq r \leq R. \end{cases} \quad (51)$$

Для внешней части вихря выполняется [61]

$$u_{\varphi}r^{n_v} = \text{const}, \quad n_v = 1 - \left[ 1 - (1 - 0,67D^{0,14}) \left( \frac{T}{283} \right)^{0,3} \right], \quad (52)$$

где  $D$  — диаметр камеры,  $T$  — температура, °K. Вычисления для моделей на рисунке 22 дают для двух конструкций  $n_v = 0,63$  и  $n_v = 0,7$  соответственно [124].

### 3.4.3. Геометрия основной рабочей камеры

Оптимизация формы рабочей камеры исследовалась во многих работах [47; 95; 122]. Рассмотрим некоторые примеры.

Рисунок 23 показывает результаты гидродинамического моделирования для циклона с квадратным горизонтальным сечением и разной высотой верхней призматической части корпуса  $H/D$ . Такие изменения в геометрии существенно изменяют структуру течения и интенсивность турбулентности. Увеличение  $H/D$  способствует повышению эффективности очистки газа от частиц с более низкой плотностью. Сравнение моделей с разной высотой  $H/D$  позволяет сделать вывод, что  $H/D = 4$  дает наилучший результат по  $\Upsilon$  (см. рис. 24).

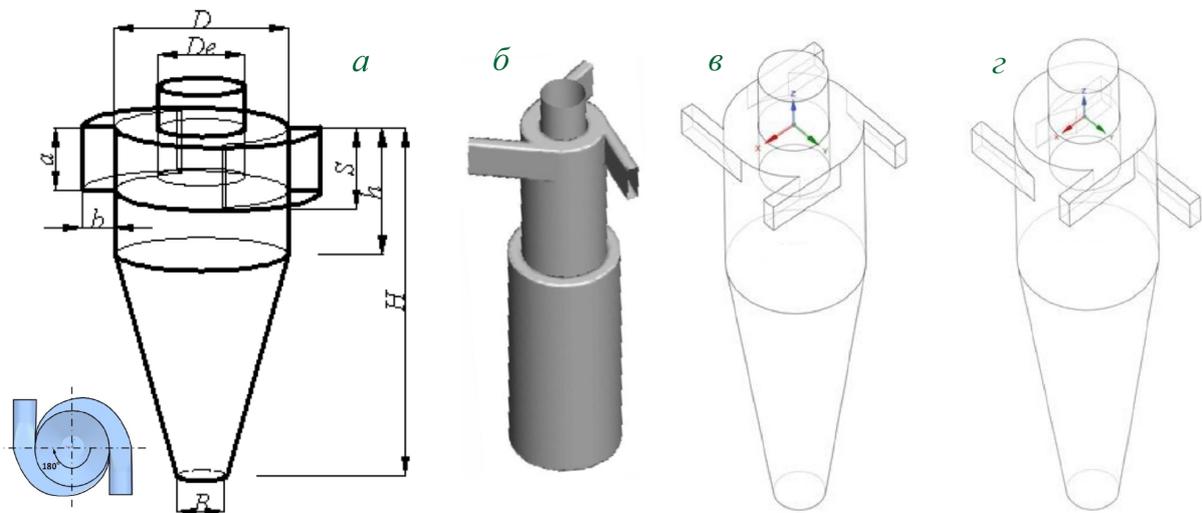


Рис. 21. а — сепаратор с двумя входными каналами [83; 124]; б — три тангенциальных входа [113]; в, г — две разные конструкции с четырьмя входными патрубками [96]

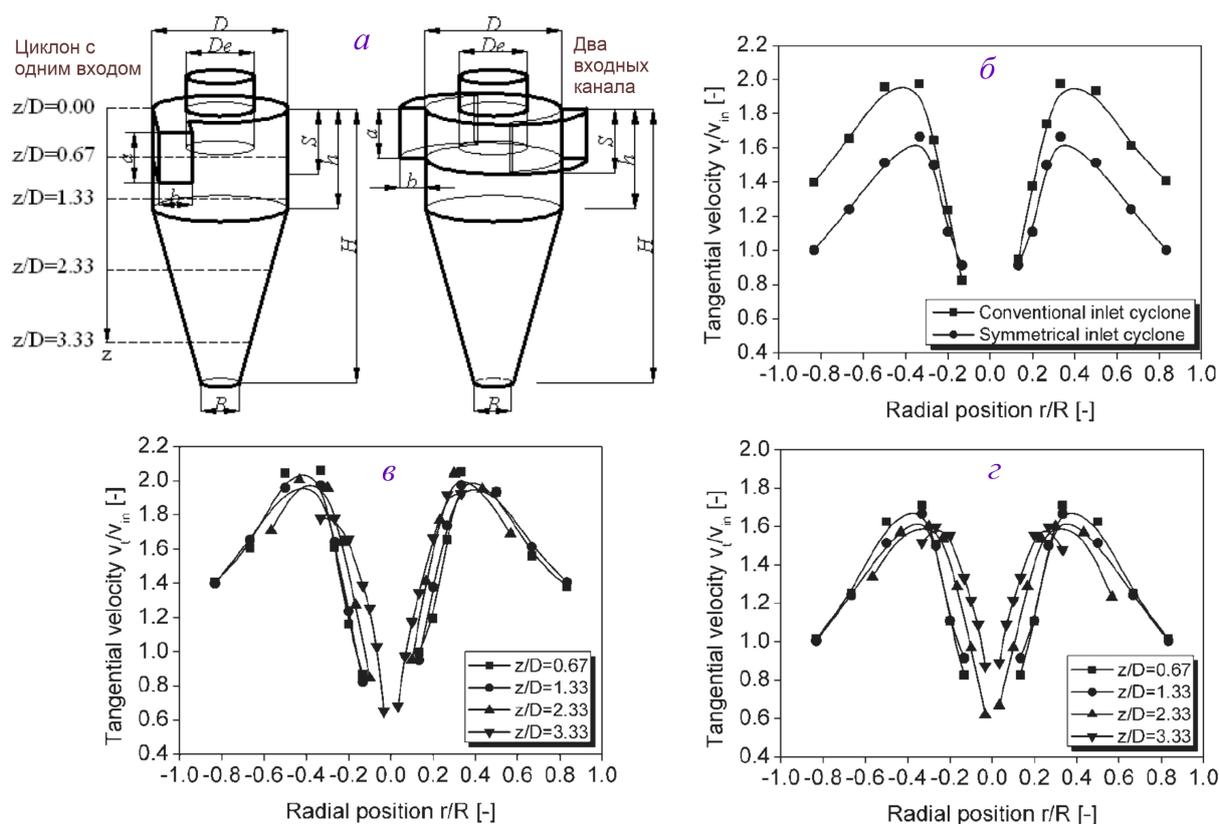


Рис. 22. Сравнение двух типов входных патрубков [124]: *a* — два типа входных каналов; *б* — тангенциальные скорости вдоль радиальной координаты на высоте  $z/D = 1,33$  для двух конструкций, изображенных на панели *a*; *в* — тангенциальные скорости в разных сечениях циклона с одним стандартным тангенциальным входом; *з* — тангенциальные скорости в разных сечениях циклона с двумя симметричными входными каналами

Численное моделирование дает, что длина и диаметр центральной трубы в циклоне, через которую выходит очищенный газ, влияет на распределение скоростей в рабочей камере и, соответственно, на эффективность улавливания частиц. Авторы [80] подробно исследуют влияние геометрии выходного патрубка на работу циклона. Отмечается, что увеличение длины выходной трубы улучшает сепарацию частиц. Диаметр этого канала существенно влияет на интенсивность завихрения и осевой обратный поток газа.

### 3.4.4. Циклон с дополнительным тангенциальным входом

Рассмотренные выше конструкции включали несколько входных патрубков, расположенных в верхней части пылеуловителя в зоне выходного канала. В работе [103] исследована конструкция с дополнительным входным патрубком, который располагается существенно ниже выходного (см. рис. 25). Расчеты в пакете ANSYS Fluent 17.1 проведены для серии циклонов с различной вертикальной координатой входа второго канала ( $0.95D, 1.4D, 1.5D, 1.95D$ ). Идея дополнительного входа заключается в попытке увеличить угловой момент нисходящего вихря.

Расход во втором канале составляет 1 650 л/мин. В первом верхнем канале он варьировался в пределах 6 600 л/мин и 8 250 л/мин, так что первый случай суммарно от двух входных потоков дает значение 8 250 л/мин. Аксиальная скорость во всех

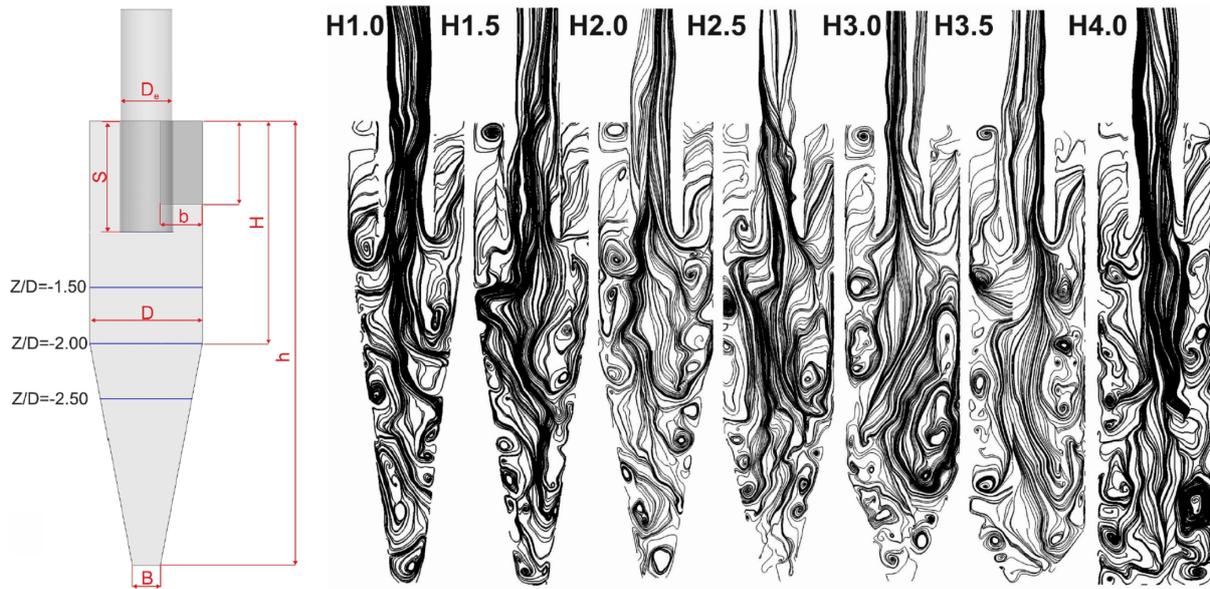


Рис. 23. Геометрические размеры квадратного циклона и линии тока для семи конструкций, имеющих различное отношение диаметров  $H/D = 1, 0; 1, 5; 2, 0; 2, 5; 3, 0; 3, 5; 4, 0$  [122]

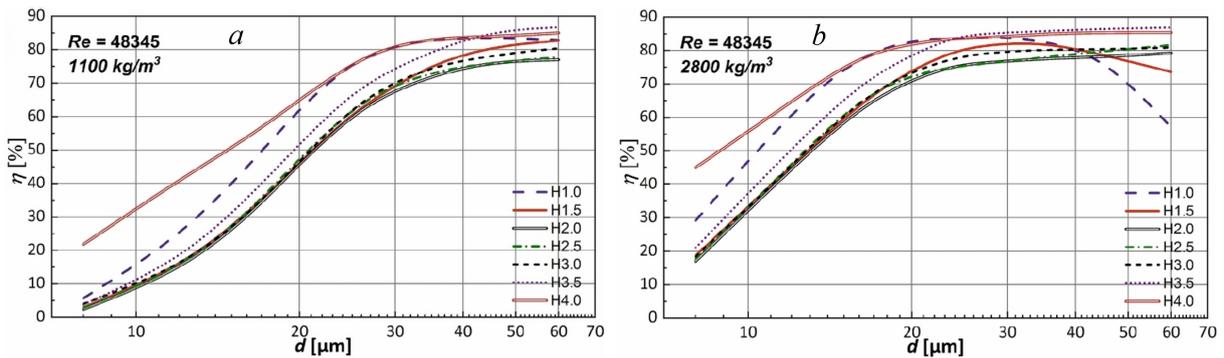


Рис. 24. Степень очистки для разных диаметров и моделей с  $H/D$  [122]:  $a$  — массовая плотность частиц  $1\ 100 \text{ кг/м}^3$ ;  $b$  —  $2\ 800 \text{ кг/м}^3$

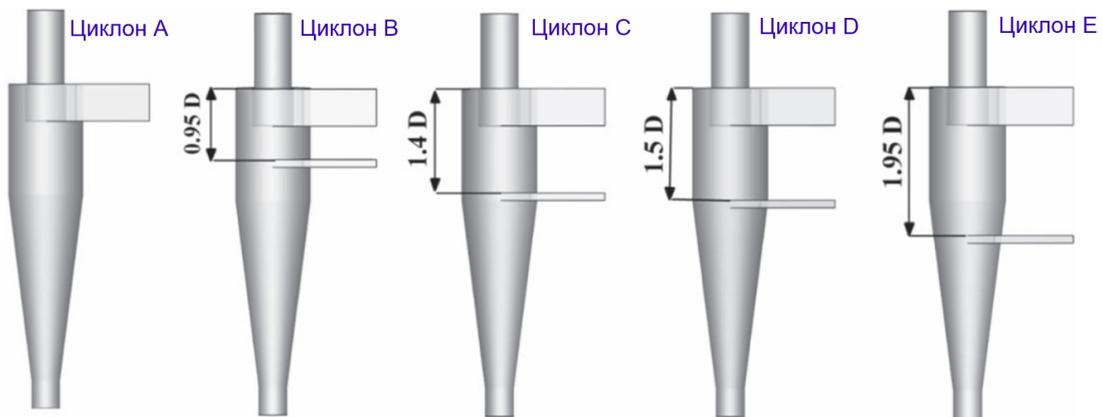


Рис. 25. Конструкция циклона включает дополнительный тангенциальный вход газа [103]

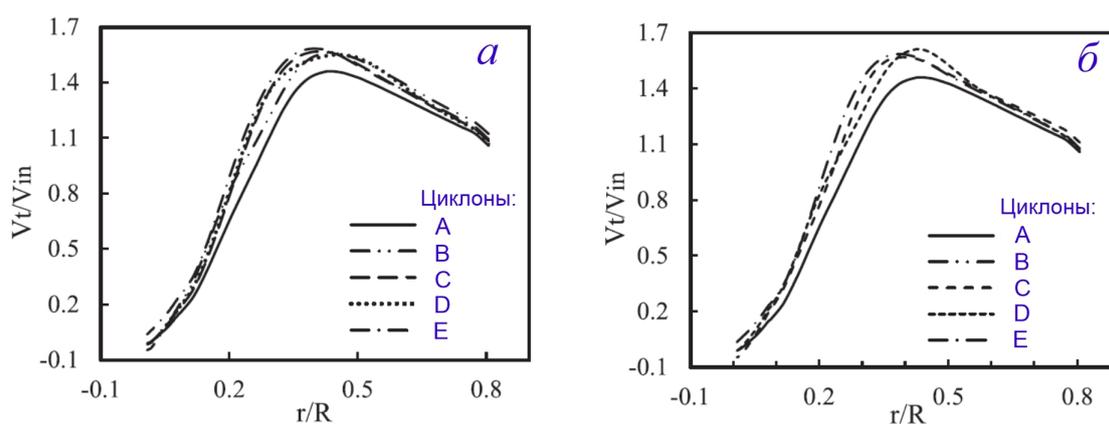


Рис. 26. Тангенциальная скорость в циклонах с дополнительным входным каналом [103].  
Конструкция циклонов А, В, С, D, Е изображена на рисунке 25

модификациях с двумя входами увеличивается по сравнению с циклоном А. Рисунок 26 показывает радиальные профили тангенциальной скорости для пяти циклонов (см. рис. 25). Измерения проведены в сечении  $z = 2,15D$ , что немного ниже входного патрубка в циклоне Е. Похожий результат получается для любых сечений ниже второго патрубка. Радиус  $r^{(v)}$ , на котором достигается максимальное значение скорости вращения, смещается ближе к оси симметрии камеры. Это, с одной стороны, увеличивает центробежную силу, действующую на пылинку, повышая эффективность сепарации. С другой стороны, сокращается время нахождения частицы внутри рабочей камеры, что может негативно влиять на очистку газа.

### 3.4.5. Проблема описания турбулентности и калибровка численных моделей

Течение при больших числах Рейнольдса  $Re$  и наличие турбулизации в потоке является причиной отсутствия точного стационарного решения. Имеются квазистационарные режимы, когда физические характеристики испытывают флуктуации около некоторого среднего значения. На рисунке 27 показаны изменения со временем некоторых величин в разных численных экспериментах.

Валидация математических моделей и их численных реализаций является важнейшей частью исследования. Любая реалистичная модель включает значительное число свободных параметров, задание которых требует сравнения с экспериментальными данными. Всегда имеются физические факторы, которые не учитываются, либо они учитываются в каком-то приближении [8; 66; 68; 87].

Перечислим источники неопределенностей, способные влиять на результаты моделирования пылеуловителей в разных условиях:

- 1) Важнейший фактор турбулентности потоков требует качественного описания иерархии вихрей. Отсутствует одна «хорошая» и универсальная модель турбулентности для рассматриваемых задач.
- 2) Проблема задания граничных условий на твердых поверхностях, которая пересекается с выбором модели турбулентности. Пристеночные течения плохо известны внутри аппаратов.
- 3) Проблема задания условий во входном и выходном сечениях патрубков.
- 4) При моделировании движения твердых частиц в потоке также возникают неопределенности для моделей динамики отдельных частиц (либо твердой фазы в двухфазном

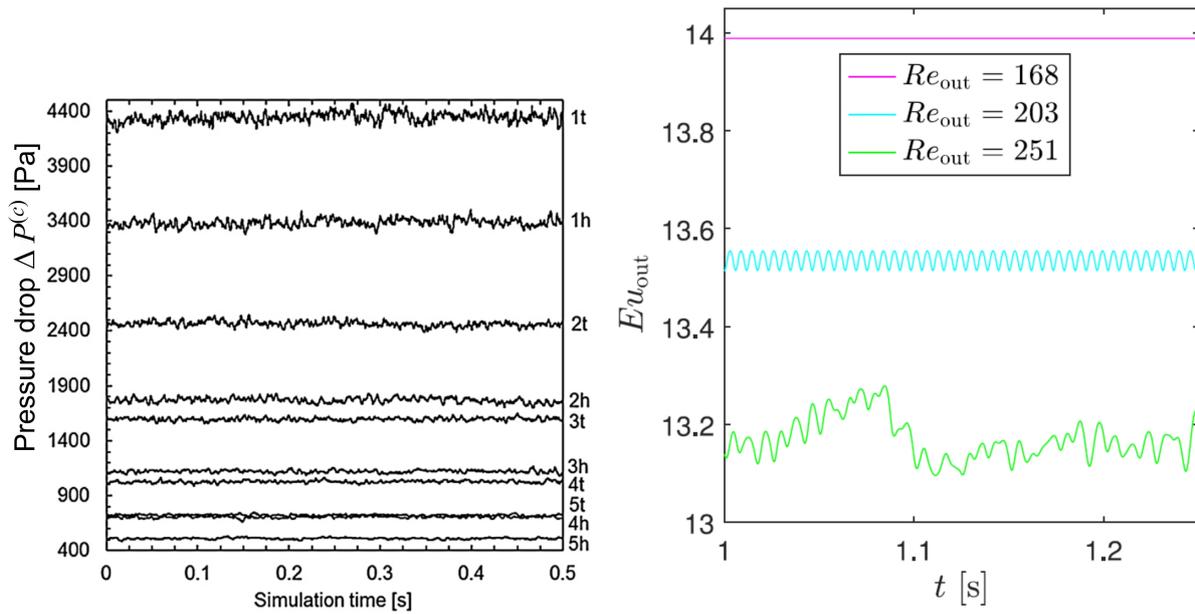


Рис. 27. Временные зависимости падения давления в различных моделях циклона (см. обозначения на правой вертикальной оси) из работы [100] (слева).

Число Эйлера от времени при различных значениях числа Рейнольдса [99] (справа)

приближении) из-за необходимости использовать приближенные формулы для описания взаимодействия между газом и частицей с заданием эмпирических констант [74].

5) Использование эмпирических и статистических зависимостей. Например, практически всегда форма пылевой частицы принимается сферической с диаметром  $d^{(p)}$ , подразумевается, что в модели используется некий эффективный диаметр  $d_{eff}^{(p)} > d^{(p)}$ , учитывающий сложную форму частицы. Однако характерные размеры частиц в трех направлениях могут различаться в несколько и даже в десятки раз. Это приводит к появлению тензора момента инерции  $\hat{I}_{ik}$  (6 чисел в общем случае) вместо массы  $m^{(p)}$  и диаметра частицы  $d^{(p)}$  в уравнениях движения. Вопрос об экспериментальном определении степени несферичности частиц в потоке требует применения сложных технологий. Одним из вариантов является измерение упругого рассеяния света частицами непосредственно в газовой фазе, что позволяет измерять коэффициент несферичности частиц размером от 500 нм до 5 мкм [123].

6) Погрешности применяемого численного метода решения дифференциальных уравнений в частных производных. К числу факторов, влияющих на вычисления полей скоростей и движение твердой фракции, относятся параметры численной схемы и численной сетки. Примером такого анализа является работа [89] (см. также рис. 8). На рисунке 28 видим очень сильное влияние числа ячеек и их размеров на структуру течения внутри циклотрубы и медленную сходимость с повышением качества сетки. Авторы используют комбинацию параллелепипедов (около стенок) и треугольных полигонов с размерами от  $\Delta \ell_{min}$  до  $\Delta \ell_{max}$ .

Сравнение модельной скорости с данными измерений выполнено в [81]. Расчет на трех разных сетках показывает, что в зоне  $r/R = 0,4-1$  согласие имеется для числа ячеек  $3 \cdot 10^5$  и их увеличение уже не дает улучшения. В центральной области  $r/R \leq 0,4$  не удастся приблизиться к данным измерений за счет более подробной сетки. Попытки валидации варьированием моделей турбулентности не дают идеальных решений для всего потока (см. рис. 29). Модель RSM лучше описывает внешнюю зону для обеих

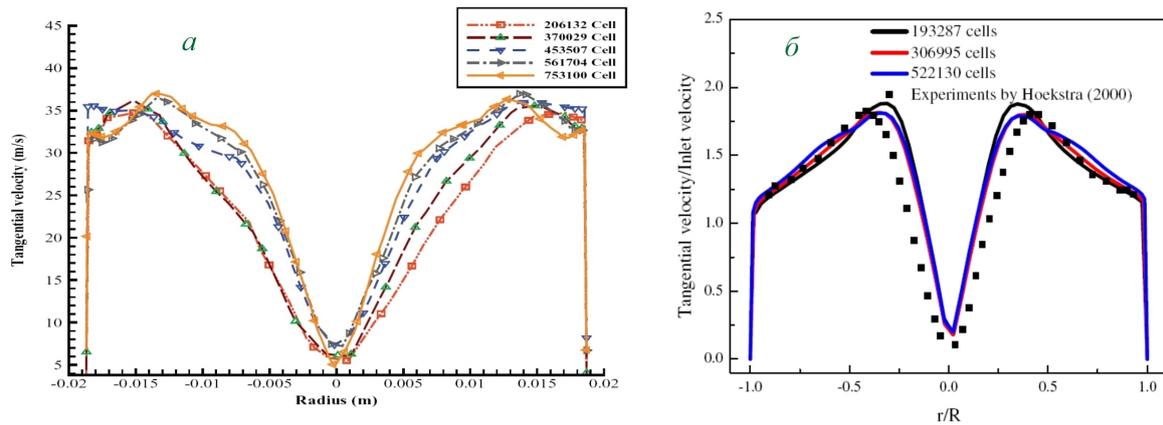


Рис. 28. *a* — тангенциальная скорость (tangential velocity) в поперечном сечении циклотрубы по результатам вычислений на пяти различных сетках [89]; *б* — профили тангенциальной скорости на разных сетках (цветные линии) и результаты измерений (черные квадратики) [81]

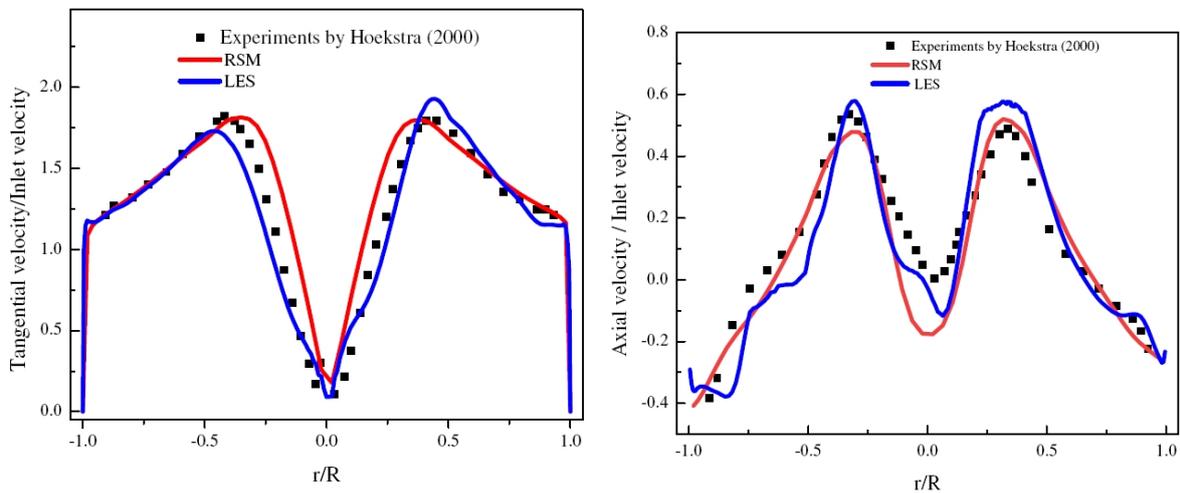


Рис. 29. Профили тангенциальной (левая панель) и осевой скоростей (правая панель) для двух моделей турбулентности [81]

компонент скорости по сравнению с моделью LES. Однако LES лучше повторяет данные измерений тангенциальной скорости во внутренней зоне. Осевая скорость в области  $r/R \leq 0,4$  воспроизводится со значительной погрешностью как для LES, так и для RSM.

Характерный радиальный профиль тангенциальной компоненты скорости на рисунке 29 показывает наличие максимума скорости вращения газа ближе к оси, что отмечалось еще в ранних работах [67]. Положение максимума и его относительная высота может варьироваться в зависимости от конструкции.

Анализ выбора моделей турбулентности проводился в [70; 81; 92; 111] и др. Общий вывод указанных и других статей, что RSM имеет в целом преимущество перед другими моделями, однако требует больше вычислительных ресурсов. Анализ газодинамических моделей рабочих режимов циклонов со скоростью втекания 5–30 м/с показывает формирование развитой турбулентности с типичными пульсациями скорости порядка 0,3–1,5 м/с.

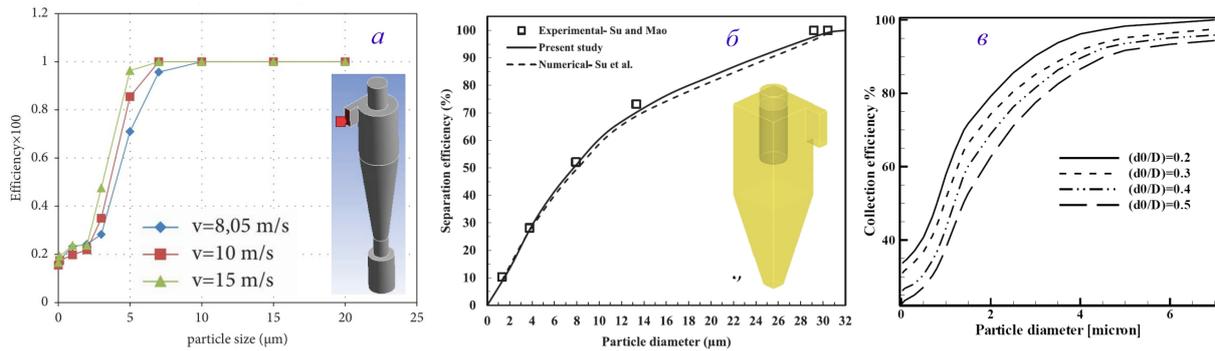


Рис. 30. Типичные зависимости эффективности сепарации от размера частиц в разных аппаратах: *a* — [70]; *б* — квадратный циклон [86]; *в* — цилиндрический корпус с конусом различного диаметра нижнего сечения  $d_0$  [60]

### 3.4.6. Эффективность очистки

Важнейшей характеристикой пылеуловителя является эффективность сепарации (или улавливания)  $\Upsilon(d^{(p)})$ , которая определяется как средняя доля частиц заданного размера (диаметра  $d^{(p)}$ ), изъятая из входного потока. Соответственно, доля частиц в выходном потоке равна  $1 - \Upsilon$ . Величина  $\Upsilon$  лежит в пределах  $0 \leq \Upsilon \leq 1$  (либо выражается в процентах). Функция  $\Upsilon(d^{(p)})$  почти всегда представляет собой монотонную растущую зависимость, являясь отражением простого физического механизма. Очень маленькая пылинка (например, меньше 0,1 мкм) является практически замороженной в газовый поток на временах нахождения газа в сухом циклоне, и всегда выйдет из аппарата вместе с газом. Поэтому  $\Upsilon(1) = 0$ . В обратном случае крупной пылинки ( $d^{(p)} > 100$  мкм) вероятность попадания такой частицы в пылесборник близка к  $\Upsilon = 100\%$ .

Рисунок 30 показывает примеры функций  $\Upsilon(d^{(p)})$ , полученные по результатам измерений или вычислительных экспериментов. Зависимости имеют типичный S-тип с переходом от нуля к 1 (100%). Эти кривые чувствительны к геометрии всех компонент циклона, скорости входящего газа или темпа поступления  $Q_{in}$  (объем в единицу времени). Это дает возможность решать задачу оптимизации, сдвигая кривую влево по шкале размеров. Панель *a* показывает повышение эффективности сепарации с ростом скорости в работе [70]. Однако повысить таким способом эффективность для частиц с  $d^{(p)} < 3$  мкм не удастся. Квадратный циклон показывает существенно более низкие значения  $\Upsilon$ . Уровень  $\Upsilon = 100\%$  достигается только для частиц с  $d^{(p)} > 30$  мкм. Численная модель на панели *б* дает хорошее согласие с результатами измерений. Панель *в* демонстрирует влияние геометрии нижней части рабочей камеры в виде усеченного конуса. Более узкий внизу конус лучше улавливает частицы, в том числе маленького размера.

Движение частиц происходит в поле скоростей газовой компоненты. Закон движения и траектория движения определяются в первую очередь эффективным диаметром частицы. Из-за квадратичной зависимости ускорения от диаметра частицы это влияние является сильным, что и позволяет проводить сепарацию наиболее тяжелых частиц. Рисунок 31 показывает примеры движения частиц в зависимости от размера и начального положения внутри входного канала [111]. Легкие частицы диаметром 1 мкм не доходят до пылесборника и захватываются восходящим потоком. Это происходит на разной высоте в зависимости от начала траектории. Например, частица на панели (рис. 31с) прижата к внутренней стороне канала и переходит из нисходящего циклона в восхо-

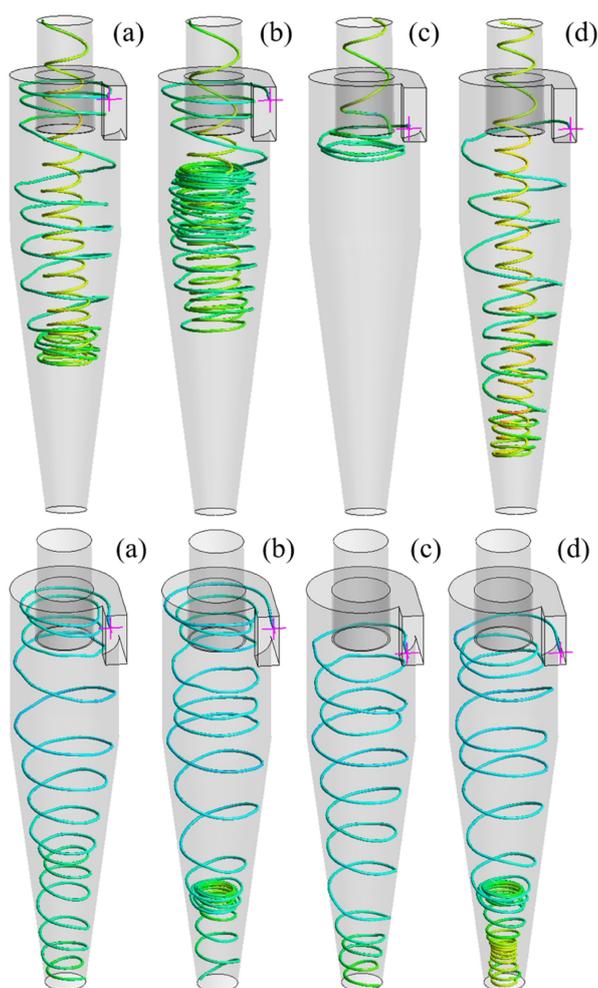


Рис. 31. Траектории движения частиц с разным начальным положением (см. пурпурные крестики) и диаметром: верхний ряд – 1 мкм, нижний ряд – 10 мкм [111]

дящий поток сразу ниже входного патрубка. Частица на панели *d* опускается почти до пылесборника и существует большая вероятность сепарации для таких маленьких частиц.

Нижний ряд на рисунке 31 показывает траектории частиц с диаметром 10 мкм, стартующих из тех же положений, что и пылинки с размером 1 мкм. Более тяжелые частицы достигают пылесборника внизу во всех четырех рассчитанных случаях.

Недостатком циклонов является плохая эффективность в отношении мелких частиц [23; 60; 79; 80]. С этой проблемой хорошо справляются рукавные фильтры, однако, имеющие высокое гидравлическое сопротивление (большое падение давления  $\Delta P^{(h)}$ ) и требующие частой замены фильтров. Компромиссным решением может быть циклон с фильтром внутри рабочей камеры [62].

#### 4. Моделирование пылеуловителя с двумя входными потоками

Рассмотрим пример моделирования воздушных потоков внутри устройства, имеющего два входных канала для поступления запыленного газа, как у ВЗП (см. рис. 7ж, 33а). Входные патрубки расположены на разной высоте прибора так, что один из пото-

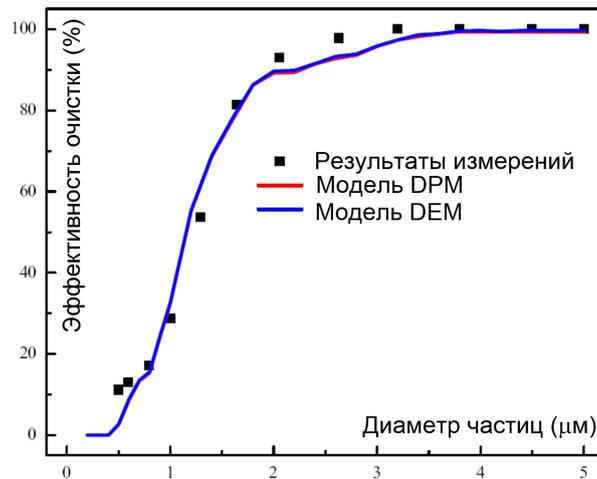


Рис. 32. Эффективность очистки для частиц разного диаметра [81]

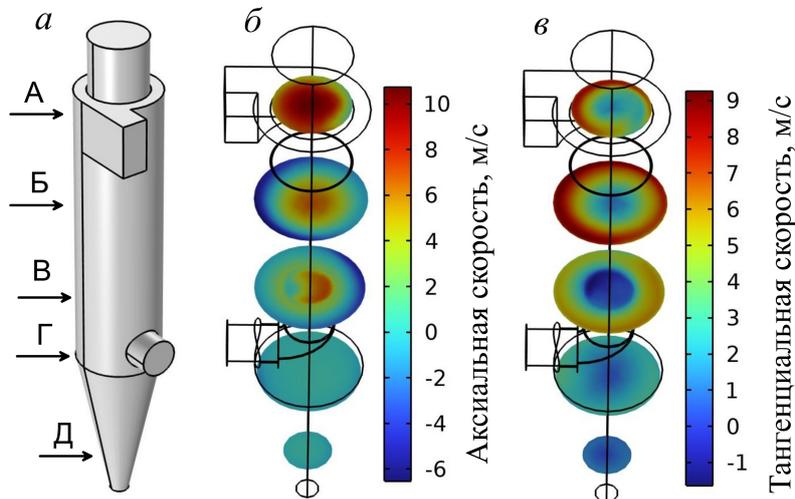


Рис. 33. *а* — трехмерная модель циклона с двумя входами; *б* и *в* — распределения аксиальной и тангенциальной компонент скорости соответственно в сечениях на различной высоте

ков опускается вниз, а второй устремляется непосредственно вверх по направлению к выходному отверстию. Такая конструкция позволяет формировать два противозакрученных потока газа. Скорости поступления газа на верхнем и нижнем входах соотносятся как 2 : 1. Для выполнения расчетов использовался пакет COMSOL Multiphysics (v. 6.1) с различными моделями турбулентности. 3D-модель установки построена в САПР AutoDesk Inventor с последующим импортированием в векторном формате STP, который является одним из стандартных в COMSOL.

Был проведен ряд вычислительных экспериментов с разными моделями турбулентности, включая: 1) алгебраическую модель (см. (раздел 2.2.1)), 2)  $k - \epsilon$  (раздел 2.2.3), 3)  $k - \omega$  (раздел 2.2.4), 4) алгебраическую модель с двумя параметрами  $\ell - v$ , 5) SST (раздел 2.2.5), 6)  $v^2 - f$  (раздел 2.2.6). Численные расчеты показывают формирование нисходящего вращающегося потока во внешней области камеры и восходящего от нижнего канала (см. рис. 33).

Хорошо заметна асимметрия аксиальной и тангенциальной скоростей относительно оси симметрии камеры из-за наличия подводящей нижней трубы. Ниже этой трубы радиальная скорость в пределах 1 м/с. Поток газа, выходящий из нижнего патрубка,

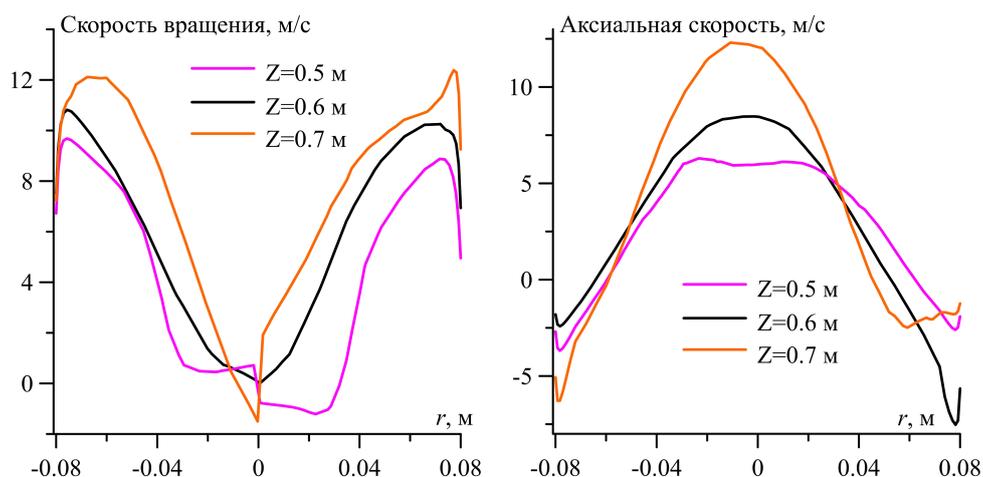


Рис. 34. Радиальные профили тангенциальной и аксиальной скорости для трех сечений на разной высоте циклона

не вращается (см. центральную зону в сечении В на рис. 33в). Поднимаясь выше, газ раскручивается за счет взаимодействия с внешним вихрем (см. сечение Б на рис. 33в). Вращение сохраняется в выходящем патрубке.

Рисунок 34 показывает радиальные зависимости двух компонент скорости газа при использовании модели турбулентности  $v^2 - f$ . Графики наглядно демонстрируют эффект раскрутки восходящего потока за счет взаимодействия с нисходящим потоком. Немного выше нижнего патрубка возникает локальный вихрь около оси аппарата в нижнем сечении ( $z = 0,5$  м).

Максимальные значения тангенциальной скорости располагаются вблизи стенки камеры, в отличие от циклонов с одним входом (см.: [29, 28, 22]), в которых максимум находится ближе к оси циклона. В работе [1] по результатам измерений в ВЗП отмечалось, что максимум тангенциальных скоростей также смещен к пристенной области.

Рисунок 35 показывает распределения вертикальной (верхний ряд) и вращательной (нижний ряд) компонент скорости для различных моделей турбулентности. По столбцам слева направо представлены результаты, соответствующие различным моделям турбулентности (см. выше). Алгебраическая модель (рис. 35, модель 1) дает более низкие максимальные значения скорости по сравнению с другими моделями.

Отметим также более гладкие распределения поля скоростей и отсутствие мелкомасштабных неоднородностей. Модели турбулентности  $k - \varepsilon$  и SST дают более детальную структуру потоков. В целом все шесть моделей турбулентности показывают качественно похожую картину течения. Однако количественные различия могут в разных зонах достигать нескольких м/с. Выбор моделей турбулентности требует проведения калибровки посредством сравнения с данными измерений.

Некоторые вопросы проектирования оптимальных ВЗП рассмотрены в работах [7; 24; 36; 38; 44; 47; 64; 65; 95].

## Заключение

В обзоре рассмотрены различные аспекты процесса очистки газа в циклонных пылеуловителях. При построении математической модели физических процессов внутри таких аппаратов необходимо учитывать конструкторские особенности циклонов и прежде

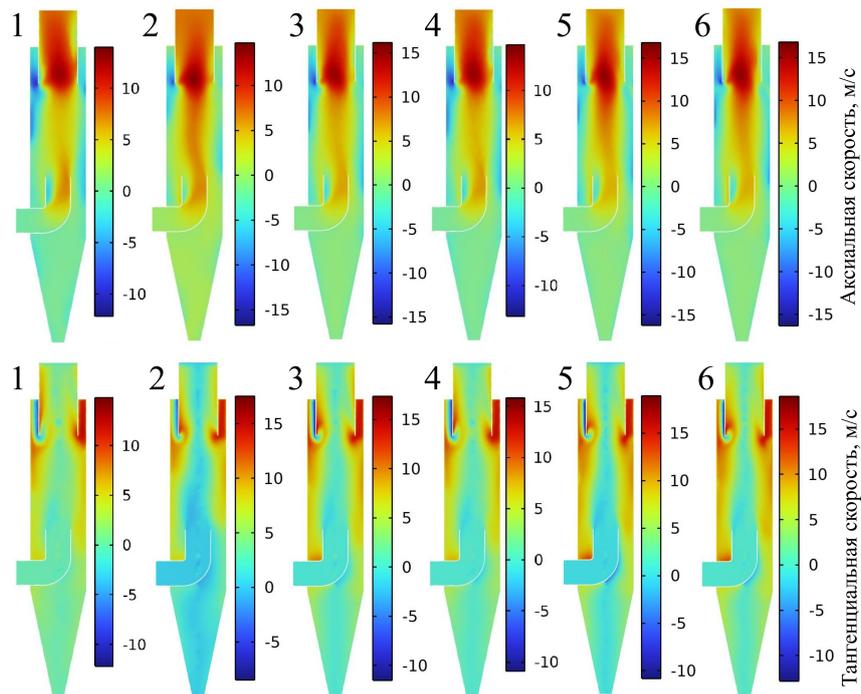


Рис. 35. Примеры распределений скоростей внутри расчетной области для шести разных моделей турбулентности (перечислены в тексте). Верхний ряд — аксиальная компонента скорости. Нижний ряд — тангенциальная компонента скорости

всего внутреннюю геометрию, скорость и термодинамические параметры газа, дисперсионный состав пыли для конкретного типа производства и ее физические характеристики.

Новый этап в исследовании инерционных методов сепарации газа и пылевой фракции связан с широким распространением программного обеспечения для трехмерного решения уравнений Навье–Стокса с турбулентностью. Важным является сопряжение гидродинамических решателей с САПР, что обеспечивает как построение сколь угодно сложной внутренней геометрии камеры пылеуловителя, так и задание граничных условий на этапе численного моделирования динамики газа и пыли. Движение газа внутри пылеуловителя центробежного типа требует качественного описания турбулентности. Мы приводим основные модели турбулентности, используемые для вычисления полей скоростей внутри циклона.

Проведенный разными авторами анализ движения газа при различных числах Рейнольдса показывает, что переход от ламинарного к развитому турбулентному течению происходит в интервале от  $Re_{in} = 200$  до  $Re_{in} = 100000$ . В зависимости от скорости втекания газа в циклон 5–30 м/с и размера входного патрубка 0,03–0,15 м, типичные значения числа Рейнольдса лежат в пределах  $10^4$ – $3 \cdot 10^5$ . Поэтому турбулентное состояние газа может заметно различаться в разных конструкциях циклонов. Основным фактором, определяющим структуру течения, является турбулентность среды, и выбор модели турбулентности лежит в основе калибровки численной модели. В настоящее время активно используются модели RSM, LES, SST, которые позволяют с хорошей точностью воспроизводить данные измерений скорости, турбулентных пульсаций и эффективности улавливания пыли разных размеров. Важно подчеркнуть, что трудно назвать модель турбулентности, которая является универсальной и обеспечивает качественные результаты для любых циклонов.

Обсуждаются работы, направленные на анализ влияния разнообразных конструк-

ций циклонов на структуру течения газа и эффективность улавливания пылевых частиц. Несмотря на значительный объем исследований сохраняются проблемы определения взаимного влияния большого числа геометрических параметров пылеуловителей и физических характеристик запыленной среды. Численные модели могут лежать в основе оптимизации параметров циклонов с целью повышения эффективности пылеулавливания (особенно для частиц малых размеров), снижения энергозатрат и увеличения сроков эксплуатации.

Результаты нашего моделирования динамики газа внутри циклона с двумя входными каналами (типа ВЗП) показали формирование основного вихря, который более сильно прижат к стенке рабочей цилиндрической камеры, чем в случае стандартного циклона.

### ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>1</sup> Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ) (грант № 23-71-00016, <https://rscf.ru/project/23-71-00016/>).

<sup>2</sup> <https://github.com/DelNov/T-Flows.git/>

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров, В. Н. Использование энергии закрутки потока для снижения аэродинамического сопротивления пылеуловителей на встречных закрытых потоках / В. Н. Азаров, Д. П. Боровков, С. В. Филиппова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая. — 2012. — Т. 2. — С. 12.
2. Азаров, В. Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками / В. Н. Азаров, Д. В. Азаров. — Волгоград : Изд-во ВолгГТУ, 2020. — 140 с.
3. Азаров, В. Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками: опыт внедрения / В. Н. Азаров. — Волгоград : Политехник, 2003. — 136 с.
4. Азаров, Д. В. Об оптимизации параметров закрутки в пылеуловителях ВЗП / Д. В. Азаров, Д. П. Боровков // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. — 2013. — Т. 3. — С. 55–60.
5. Акулич, А. В. Эффективные способы и вихревые аппараты для очистки пылегазовых выбросов от мелкодисперсных частиц / А. В. Акулич, В. М. Лустенков, А. А. Акулич // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. — 2018. — № 1 (24). — С. 75–81.
6. Алиев, Т. Т. Моделирование в среде Ansys течения многокомпонентной газовой смеси через циклон ЦКБН пылеуловителя ГП-628 на участке очистки газа / Т. Т. Алиев, С. Н. Беляев, А. С. Галахарь // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2014. — Т. 10 (655). — С. 25–30.
7. Артюхин, А. С. Сравнение аппаратов ВЗП и циклонов при очистке выбросов в атмосферу предприятий стройиндустрии / А. С. Артюхин, А. В. Баев, А. С. Тюрин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2006. — Т. 6. — С. 161–164.
8. Валидация численного решения задачи о течении запыленного потока воздуха в прямом канале / А. М. Зиганшин, В. Л. Черных, К. И. Логачев, Р. Р. Сарчин // Известия КГАСУ. — 2025. — № 2 (72). — С. 8–20. — DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.1
9. Василевский, М. В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами / М. В. Василевский. — Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. — 248 с.
10. Ватин, Н. И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон / Н. И. Ватин, К. И. Стрелец. — СПб. : С.-Петерб. гос. политехн. ун-т, 2003. — 65 с.

11. Введение в компьютерное моделирование гидродинамических процессов в программном комплексе OpenFOAM / А. Н. Нуриев, О. Н. Зайцева, А. М. Камалутдинов, О. С. Жучкова. — Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2022. — 84 с.
12. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности / Е. А. Штокман, В. А. Шилов, Е. Е. Новгородский, Т. А. Скорик, Р. А. Амерханов. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. — 632 с.
13. Ветошкин, А. Г. Процессы и аппараты пылеочистки / А. Г. Ветошкин. — Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. — 210 с.
14. Возвратно-поточные циклоны. Истоки возникновения и направления совершенствования / Ю. М. Фадин, В. С. Богданов, М. В. Юрьева, А. В. Вечканов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2017. — № 5. — С. 104–109.
15. Ганопольский, Р. М. Гидродинамическое моделирование на OpenFOAM / Р. М. Ганопольский, А. Я. Гильманов. — Тюмень : ТюмГУ-Press, 2025. — 160 с.
16. Гольцов, А. Б. Вихревая вентиляция. Закрученные рециркуляционные, отрывные пылевоздушные течения / А. Б. Гольцов, К. И. Логачев, О. В. Тирон. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2025. — 349 с.
17. Гупта, А. Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. — М. : Мир, 1987. — 588 с.
18. Даниленко, Н. В. Влияние конструктивных параметров вихревого пылеуловителя на гидродинамику аппарата / Н. В. Даниленко, Н. М. Кузнецова, Р. В. Романюк // Современная наука: проблемы, идеи, тенденции: материалы междунар. науч.-практ. конф. — 2019. — С. 55–59.
19. Демидова, О. Л. Численное моделирование закрученных струй с неравновесными химическими процессами / О. Л. Демидова // Труды МАИ. — 2012. — № 57.
20. Закономерности движения частиц порошка в зоне сепарации цилиндрической формы классификатора центробежного типа / В. В. Жидков, В. С. Богданов, И. А. Семикопенко, И. Н. Логачев, В. Г. Дмитриенко // Вестник БГТУ. — 2012. — № 1. — С. 60–65.
21. Катин, В. Д. Модернизация и разработка новых эффективных золо- и пылеуловителей для защиты среды обитания человека / В. Д. Катин, М. Х. Ахтямов, Р. В. Долгов. — М. : Спутник+, 2015. — 116 с.
22. Катин, В. Д. Расчет и подбор рациональных конструкций пылезолоулавливающих устройств / В. Д. Катин, М. Х. Ахтямов, Р. В. Долгов. — Хабаровск : Дальневосточ. гос. ун-т путей сообщения, 2020. — 150 с.
23. Кнышенко, Ю. В. Методика расчетно-экспериментального прогноза эффективности вихревого пылеуловителя / Ю. В. Кнышенко // Техническая механика. — 2012. — Т. 4. — С. 59–66.
24. Конструкции, расчет и аэродинамическая оптимизация вихревых пылеуловителей в производстве строительных материалов / Ю. В. Красовицкий, В. И. Николаев, Н. В. Пигловский, М. Н. Федорова // Строительные материалы. — 2010. — Т. 5. — С. 84–87.
25. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители / В. А. Лазарев. — Н. Новгород : ОЗОН-НН, 2006. — 320 с.
26. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М. : Наука, 1986. — 736 с.
27. Лапин, Ю. В. Алгебраические модели турбулентности для пристенных канонических течений (немного истории и некоторые новые результаты) / Ю. В. Лапин, А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец // Научно-технические ведомости СПбГТУ. — 2004. — № 2. — С. 81–82.
28. Луканин, Д. В. Теоретическое и экспериментальное обоснование режимно-конструктивных характеристик вентиляционных систем с пылеуловителями на встречных закрученных потоках / Д. В. Луканин. — Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2016. — 180 с.
29. Минко, В. А. Обеспыливающая вентиляция / В. А. Минко, И. Н. Логачев, К. И. Логачев. — М. : Теплотехник, 2009. — 458 с.
30. Мисюля, Д. И. Сравнительный анализ технических характеристик циклонных

пылеуловителей / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Труды БГТУ. по. 3. Химия и технология неорганических веществ. — 2012. — С. 154–163.

31. Мисюля, Д. И. Экспериментальное и численное определение гидравлического сопротивления высокоэффективного циклона СЦН-40 / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, О. А. Петров // Труды БГТУ. № 3. Химия и технология неорганических веществ. — 2016. — Т. 3 (185). — С. 154–160.

32. Мозохин, А. Е. Методика обеспечения комфортного состояния микроклимата умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей / А. Е. Мозохин // Информатика и автоматизация. — 2021. — Т. 20 (6). — С. 1418–1447. — DOI: 10.15622/ia.20.6.9

33. Мотренко, Д. В. Обоснование выбора и расчет циклонов для очистки воздуха / Д. В. Мотренко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2020. — Т. 4 (53). — С. 77–81.

34. Насибуллин, Т. Р. Примеры решения типовых задач в программе FlowVision / Т. Р. Насибуллин, И. Э. Лукьянова, И. Р. Мирсаев. — Уфа : Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2017. — 71 с.

35. Николенко, С. Д. Защита атмосферного воздуха с целью обеспечения безопасных условий труда на асфальтобетонных заводах / С. Д. Николенко, С. А. Сазонова, М. В. Мамохин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. — 2016. — № 2 (13). — С. 66–75.

36. Оптимизация конструктивных параметров пылеуловителей ВЗП в системах обеспыливания и вентиляции / С. Д. Стрекалов, С. А. Богомолов, В. П. Батманов, Е. О. Черевиченко, М. А. Николенко, О. В. Бурлаченко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 47. — С. 310–319.

37. Опыт прямого численного моделирования турбулентных пограничных слоев в сложных течениях / А. В. Гарбарук, А. С. Стабников, М. Х. Стрелец, А. К. Травин, М. Л. Шур // Прикладная математика и механика. — 2025. — Т. 89, № 5. — С. 718–751.

38. Остаали, М. Н. Совершенствование оценки фракционного проскока выбросов пыли в атмосферу от аппаратов ВЗП в производстве стройматериалов / М. Н. Остаали. — Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2020. — 126 с.

39. Петров, В. И. Аэрогидродинамика вихревых аппаратов очистки отходящих газов / В. И. Петров. — Казань : КНИТУ, 2023. — 156 с.

40. Пшенов, Е. А. Обоснование конструктивных параметров вихревой воронки двухступенчатого циклона с применением компьютерного моделирования / Е. А. Пшенов, С. С. Блескин // Инновации и продовольственная безопасность. — 2024. — № 1 (43). — С. 175–184.

41. Расчет гидродинамики потоков в возвратно-поточных циклонах при помощи пакета прикладных программ Flow Vision / Ю. Г. Чесноков, И. Г. Лихачев, О. М. Флисюк, Н. А. Марцулевич, В. П. Мешалкин, А. В. Гарабаджиу // Российский химический журнал. — 2022. — Т. 66, № 3. — С. 56–60. — DOI: 10.6060/rcj.2022663.8

42. Рудыка, Е. А. Обоснование выбора циклона при проектировании систем пылеулавливания на предприятиях химического и пищевого производства / Е. А. Рудыка, Е. В. Батурина, А. Б. Емельянов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. — 2019. — № 1. — С. 64–68.

43. Сажин, Б. С. Пылеуловители со встречными закрученными потоками / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим // Химическая промышленность. — 1985. — № 8. — С. 50–54.

44. Сергина, Н. М. Аппараты ВЗП с отсосом из бункерной зоны в производстве строительных материалов / Н. М. Сергина // Альтернативная энергетика и экология. — 2013. — Т. 10. — С. 43–45.

45. Скрыпник, А. И. Расчет характеристик пылеулавливающих установок вентиляционных систем / А. И. Скрыпник. — Воронеж : Воронеж. гос. архит.-строит. ун-т, 2004. — 126 с.

46. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. В. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков, В. Ю. Падва, А. А. Русанов, И. И. Урбах. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 312 с.
47. Сравнение сепарационных элементов различной формы в пылеуловительном устройстве при очистке запыленного воздуха от пищевой пыли / А. А. Абдуллина, В. Э. Зинуров, Л. Т. Воронина, И. А. Валиуллин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2024. — Т. 199. — С. 1–8.
48. Стабников, А. С. Сравнительный анализ алгебраических моделей ламинарно-турбулентного перехода / А. С. Стабников, А. В. Гарбарук, А. А. Матюшенко // Математическое моделирование. — 2024. — Т. 36. — С. 141–157. — DOI: 10.20948/mm-2024-01-09
49. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник. Т. 1 / А. С. Тимонин. — М.; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. — 917 с.
50. Халатов, А. А. Теория и практика закрученных потоков / А. А. Халатов. — Киев : Наукова думка, 1989. — 192 с.
51. Храпов, С. С. Численное моделирование двумерных газодинамических течений в многокомпонентных неравновесных средах / С. С. Храпов // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2025. — Т. 28, № 1. — С. 60–87. — DOI: 10.15688/mrsm.jvolsu.2025.1.5
52. Численное моделирование воздушного потока в аспирационной воронке с выравнивающим устройством / А. Б. Гольцов, К. И. Логачев, О. А. Аверкова, Ю. В. Елистратова, А. С. Семиненко // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2024. — Т. 7. — С. 64–75. — DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012037
53. Численное определение границ вихревых зон на входе в круглые отсосы-раструбы над плоскостью / К. И. Логачев, А. М. Зиганшин, О. В. Тирон, О. А. Аверкова, Е. Н. Попов, В. А. Уваров, А. Б. Гольцов // Строительство и техногенная безопасность. — 2022. — Т. 1. — С. 251–260.
54. Шаптала, В. Г. Математическое и компьютерное моделирование систем обеспыливания производства строительных материалов / В. Г. Шаптала, В. В. Шаптала. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2017. — 163 с.
55. Шаптала, В. Г. Моделирование очистки газов в пылеосадительных камерах цементных печей / В. Г. Шаптала, В. В. Шаптала // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2017. — № 4. — С. 132–137.
56. Шуктомова, А. Г. Численное моделирование улавливания частиц в циклонном сепараторе / А. Г. Шуктомова, А. Ш. Шаймухаметова, М. Г. Кузнецов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2024. — № 203. — С. 415–422.
57. Эффективность и потери давления в аппаратах с закрученными потоками / М. Т. Баходирова, Д. Курбонов, А. А. Бадалов, Р. Р. Жураев, Г. К. Бектурдиев, М. А. Махаматжанов // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. — 2022. — Т. 2-1, № 76. — С. 320–325.
58. A Systematic Literature Review on Smart and Personalized Ventilation Using CO<sub>2</sub> Concentration Monitoring and Control / G. Song, Z. Ai, Z. Liu, G. Zhang // Energy Reports. — 2022. — Vol. 8. — P. 7523–7536.
59. A Systematic Review for Indoor and Outdoor Air Pollution Monitoring Systems Based on Internet of Things / O. Alsamrai, M. D. Redel-Macias, S. Pinzi, M. P. Dorado // Sustainability. — 2024. — Vol. 16. — P. 4353. — DOI: 10.3390/su16114353
60. Ajarostaghi, S. S. M. Numerical Investigation the Effects of Cone Diameters on the Flow Pattern and Separation Efficiency in a Cyclone Separator / S. S. M. Ajarostaghi, S. S. Mousavi, C. Bhojaraju // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2023. — Vol. 1149. — P. 012005. — DOI: 10.1088/1755-1315/1149/1/0120051
61. Alexander, R. M. Fundamentals of Cyclone Design and Operation / R. M. Alexander // Proceedings of Australian Institute of Mining Metallic Processes. — 1949. — Vol. 152. — P. 203–228.

62. Analysis of the Performance of a Novel Dust Collector Combining Cyclone Separator and Cartridge Filter / B. Xie, S. Li, H. Jin, S. Hu, F. Wang, F. Zhou // *Powder Technology*. — 2018. — Vol. 339. — P. 695–701. — DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.103
63. Ayl, E. A Comprehensive Review of Cyclone Separator Technology / E. Ayl, E. Kocak // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. — 2025. — Vol. 103. — P. 2751–2789. — DOI: 10.1002/cjce.25526
64. Azarov, V. N. Application of Swirling Flows in Aspiration Systems / V. N. Azarov, D. P. Borovkov, A. M. Redhwan // *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. — 2014. — Vol. 8. — P. 750–753.
65. Azarov, V. N. Experimental Study of Secondary Swirling Flow Influence on Flows Structure at Separation Chamber Inlet of Dust Collector with Countercurrent Swirling flows / V. N. Azarov, D. P. Borovkov, A. M. Redhwan // *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. — 2014. — Vol. 8. — P. 851–856. — DOI: 10.15866/ireme.v8i5.3455
66. Bogdanov, D. Numerical Simulation of Turbulent Flow in a Cyclonic Separator / D. Bogdanov, S. Poniaev // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2014. — Vol. 572. — P. 012056. — DOI: 10.1088/1742-6596/572/1/012056
67. Browne, J. M. Pressure Drop Reduction in Cyclones / J. M. Browne, W. Strauss // *Atmospheric Environment*. — 1967. — Vol. 12. — P. 1213–1221.
68. Calibration of the  $k - \omega$  SST Turbulence Model for Free Surface Flows on Mountain Slopes Using an Experiment / D. Romanova, O. Ivanov, V. Trifonov, N. Ginzburg, D. Korovina, B. Ginzburg, N. Koltunov, M. Eglit, S. Strijhak // *Fluids*. — 2022. — Vol. 7. — P. 111.
69. Casal, J. A Better Way to Calculate Cyclone Pressure Drop / J. Casal, J. M. Martinez-Benet // *Chemical Engineering*. — 1983. — Vol. 99. — P. 100–111.
70. CFD Simulation of an Industrial Dust Cyclone Separator: A Comparison with Empirical Models: The Influence of the Inlet Velocity and the Particle Size on Performance Factors in Situation of High Concentration of Particles / T. V. Paganel, E. F. Alban, M. A. Cyrille, C. V. N. Abbe // *Journal of Engineering*. — 2024. — Vol. 2024. — P. 1–31. — DOI: 10.1155/2024/5590437
71. Coker, A. K. Understand Cyclone Design / A. K. Coker // *Chemical Engineering Progress*. — 1993. — Vol. 89. — P. 51–55.
72. Comparative Assessment of Turbulence Models for Predicting Square Cyclone Separator Performance / C. I. N. Izzah, Yunardi, M. Reza, N. Sylvia, N. Malahayati, F. Mulana, M. Fairweather // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. — 2025. — Vol. 127, № 1. — P. 140–160.
73. Comparative Performance Analysis Between Conventional and Square Cyclones for Solid Particle-Gas Separation: A Review / Malahayati Nur, D. Darmadi, CutAlisa Putri, L. Mairiza, W. Rinaldi, Y. Yunardi // *Materials Today: Proceedings*. — 2022. — Vol. 63. — P. 318–325. — DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.157
74. Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of Cyclone Separators Connected in Series / A. A. Vegini, H. F. Meier, J. J. Iess, M. Mori // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2007. — Vol. 47, № 1. — P. 192–200.
75. Shepherd, C. B. Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors / C. B. Shepherd, C. E. Lapple // *Industrial and Engineering Chemistry*. — 1939. — Vol. 91, № 8. — P. 972–984. — DOI: 10.1021/ie50356a012
76. Dehdarinejad, E. Performance Analysis of a Novel Cyclone Separator Using RBFNN and MOPSO Algorithms / E. Dehdarinejad, M. Bayareh // *Powder Technology*. — 2023. — Vol. 426. — P. 118663. — DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118663
77. Dirgo, J. Relationships Between Cyclone Dimensions and Performance / J. Dirgo. — Cambridge : Harvard University, 1988. — 250 p.
78. Dziubak, T. Theoretical and Experimental Studies of Uneven Dust Suction from a Multi-Cyclone Settling Tank in a Two-Stage Air Filter / T. Dziubak // *Energies*. — 2021. — Vol. 14. — P. 8396. — DOI: 10.3390/en14248396
79. Effect of Geometric Parameters on the Performance of Cyclone Separator Using CFD

/ P. K. Ithape, S. B. Barve, S. S. Pande, A. R. Nadgire // International Journal of Current Engineering and Technology. — 2017. — Vol. 7. — P. 288–292.

80. Effects of Operational and Geometrical Parameters on Velocity Distribution and Micron Mineral Powders Classification in Cyclone Separators / X. Yang, J. Yang, S. Wang, Y. Zhao // Powder Technology. — 2022. — Vol. 407. — P. 117609. — DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117609

81. Effect of the Inlet Angle on the Performance of a Cyclone Separator Using CFD-DEM / S. Wanga, H. Lia, R. Wanga, X. Wanga, R. Tian, Q. Sun // Advanced Powder Technology. — 2019. — Vol. 30. — P. 227–239. — DOI: 10.1016/j.appt.2018.10.027

82. Effects of Helical Guide Vanes on Droplet Behavior and Separation Performance in Cyclone Separators / S. Fu, L. Tao, Z. Shen, M. Xu, D. Yanga, Y. Hu, F. Zhou // Chemical Engineering & Processing: Process Intensification. — 2025. — Vol. 209. — P. 110197.

83. El-Emam, M. A. Predicting the Performance of Aero-Type Cyclone Separators with Different Spiral Inlets Under Macroscopic Bio-Granular Flow Using CFD-DEM Modelling / M. A. El-Emam, L. Zhou, A. I. Omara // Biosystems Engineering. — 2023. — Vol. 233. — P. 125–250.

84. Experimental and Numerical Investigations of a Dual-Stage Cyclone Separator / T. Zhang, K. Guo, C. Liu, Y. Li, M. Tao, S. Chong // Chemical Engineering & Technology. — 2018. — Vol. 41. — P. 606–617. — DOI: 10.1002/ceat.201700052

85. Experimental Research of Gaseous Emissions Impact on the Performance of New-Design Cylindrical Multi-Channel Cyclone with Adjustable Half-Rings / A. Chlebnikovas, D. Paliulis, K. Kilikeviciene, A. Kilikevicius // Sustainability. — 2022. — Vol. 14. — DOI: 10.3390/su14020902

86. Fatahian, H. Square Cyclone Separator: Performance Analysis Optimization and Operating Condition Variations Using CFD-DPM and Taguchi Method / H. Fatahian, E. Fatahian, R. Erfani // Powder Technology. — 2023. — Vol. 428. — P. 118789.

87. Flow Simulation of Gas Cyclone Separator at High Reynolds Number Using the Elliptic-Relaxation Hybrid LES/RANS (ER-HRL) Model / M. Sayed, A. Dehbi, B. Niceno, K. Mikityuk, M. Krinner // 6<sup>th</sup> World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT 21). — 2021. — DOI: 10.11159/icmfht21.lx.110

88. FlowVision Software: Numerical Simulation of Industrial CFD Applications on Parallel Computer Systems / A. A. Aksenov, S. A. Kharchenko, V. N. Konshin, V. I. Pokhilko // Parallel Computational Fluid Dynamics 2003. — 2004. — P. 401–408. — DOI: 10.1016/B978-044451612-1/50051-2

89. Golestaneh, S. M. Separation of Particles from the Gas by Using of Cyclonic Separation in the Cyclotubes of Scrubber Installed in Gas Compressor Station / S. M. Golestaneh, D. Toghraie // Powder Technology. — 2019. — Vol. 343. — P. 392–421. — DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.068

90. Influence of a Spiral Guide Vane on the Flow Field and Particle Deposition Outside the Vortex Finder of FCC Disengager Cyclone Separators / G. Cao, J. Sun, G. Sun, F. Zhou, S. Fu // Energy. — 2025. — Vol. 337. — P. 138593.

91. Iozia, D. L. The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency / D. L. Iozia, D. Leith // Aerosol Science and Technology. — 1990. — Vol. 12. — P. 598–606.

92. Jiao, J. Evaluations and Modifications on Reynolds Stress Model in Cyclone Simulations / J. Jiao, Z. Liu, Y. Zheng // Chemical Engineering & Technology. — 2007. — Vol. 30. — P. 15–20.

93. Kosygin, V. Mathematical Modelling of Dust-Gas Flow in Dust Collection Cyclones and Optimization of Their Parameters / V. Kosygin, V. Katin, A. Zhuravlev // E3S Web of Conferences. — 2025. — Vol. 646. — DOI: 10.1051/e3sconf/202564600025

94. Kourou, A. Gas-Liquid and Liquid-Liquid Vortex Technology for Process Intensification / A. Kourou, S. Chen, Y. Ouyang // Current Opinion in Chemical Engineering. — 2024. — Vol. 46. — P. 101056. — DOI: 10.1016/j.coche.2024.101056

95. Kuzmin, V. V. Selecting the Most Economical Cyclone Standard Size / V. V. Kuzmin

// Chemical and Petroleum Engineering. — 2023. — Vol. 58. — P. 798–805. — DOI: 10.1007/s10556-023-01164-x

96. Le, D. K. Numerical Investigation on the Performance and Flow Pattern of Two Novel Innovative Designs of Four-Inlet Cyclone Separator / D. K. Le, J. Y. Yoon // Chemical Engineering & Processing: Process Intensification. — 2020. — Vol. 150. — P. 107867. — DOI: 10.1016/j.cep.2020.107867

97. Logachev, I. N. Industrial Air Quality and Ventilation: Controlling Dust Emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev. — : CRC Press, 2014. — 393 p.

98. Mathematical Modelling of Turbulent Combustion of Two-Phase Mixtures of Gas and Solid Particles with a Eulerian–Eulerian Approach: The Case of Hydrogen Combustion in the Presence of Graphite Particles / F. Nicolas-Perez, F. J. S. Velasco, R. A. Oton-Martinez, J. R. Garcia-Cascales, A. Bentaib, N. Chaumeix // Mathematics. — 2021. — Vol. 9 — DOI: <https://doi.org/10.3390/math9172017>

99. Misiulia, D. Cyclone Dimensionless Pressure Drop, Cut Size, and Separation Slope: One Dimensionless Number (Reynolds) to Rule Them All / D. Misiulia, G. Liden, S. Antonyuk // Particuology. — 2024. — Vol. 95. — P. 235–251.

100. Misiulia, D. Effects of the Inlet Angle on the Flow Pattern and Pressure Drop of a Cyclone with Helical-Roof Inlet / D. Misiulia, A. G. Andersson, T. S. Lundstrom // Chemical Engineering Research and Design. — 2015. — Vol. 102. — P. 307–321.

101. Modabberifar, M. Modeling and Numerical Simulation of Flow Field in Three Types of Standard New Design Cyclone Separators / M. Modabberifar, H. Nazaripoora, H. Safikhani // Advanced Powder Technology. — 2021. — Vol. 32. — P. 4295–4302.

102. Moukalled, F. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab. Fluid Mechanics and Its Applications / F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish. — : Springer, 2015. — 791 p.

103. Noori, S. Numerical Simulation of Gas-Solid Flow in a Cyclone Separator with Additional Inlet / S. Noori, M. Saidi // Engineering Research Express. — 2024. — Vol. 6. — P. 015045. — DOI: 10.1088/2631-8695/ad1d8c

104. Numerical Analysis of Aingle SC-50-800 and SC-50-500x2-x4 Group Centrifugal Cyclones: Efficiency Comparison / M. Madaliev, M. Usmonov, K. Kadyrov, N. Abdullajonov, D. Mavlonova, Z. Otakhanova, K. Muminov // E3S Web of Conferences. — 2024. — Vol. 508. — P. 06005. — DOI: 10.1051/e3sconf/202450806005

105. Numerical Analysis on the Influence of Vortex Motion in a Reverse Stairmand Cyclone Separator by using LES Model / Z.-W. Gao, Z.-X. Liu, Y.-D. Wei, C.-X. Li, S.-H. Wang, X.-Y. Qi, W. Huang // Petroleum Science. — 2022. — Vol. 19. — P. 848–860.

106. Numerical and Experimental Studies of Airflows at Exhaust Hoods with Inlet Extensions / K. I. Logachev, E. N. Popov, T. A. Kozlov, A. M. Ziganshin, R. Gao, O. A. Averkova, O. V. Tiron // Building and Environment. — 2024. — Vol. 261. — P. 111753.

107. Numerical Calculation of the Boundaries of Vortex Zones at the Inlet to Round Exhaust Hoods with Three Shelves / O. A. Averkova, K. I. Logachev, T. A. Kozlov, E. N. Popov, V. G. Dmitrienko // Refractories and Industrial Ceramics. — 2023. — Vol. 63. — P. 681–686.

108. Numerical Models of Ventilation Systems for Cement Manufacturing Facility Based on Hydrodynamic Simulation / E. S. Savin, A. S. Kuzmich, J. V. Startseva, A. V. Titov, A. V. Khoperskov // AIP Conference Proceedings. — 2021. — Vol. 2410. — P. 020023. — DOI: 10.1063/5.0067647

109. Numerical Simulation and Experiment of Dust Suppression Device of Peanut Whole-Feed Combine Using Computational Fluid Dynamics / H. Xu, P. Zhang, F. Gu, Z. Hu, H. Yang, E. Mao, Y. Du // Agriculture. — 2023. — Vol. 13. — P. 329. — DOI: 10.3390/agriculture13020329

110. Numerical Study of Highly Efficient Centrifugal Cyclones / M. Madaliev, Z. Abdulkhaev, Y. Khusanov, S. Mirzababayeva, Z. Abobakirova // Acta Hydrotechnica. —

2025. — P. 143–157. — DOI: 10.15292/acta.hydro.2024.08

111. Peculiarities of Particle Motion Inside Cyclone Separator by Using LES-DRW Model / Z. Gao, Z. Liua, Z. Songb, C. Lia, X. Qia, H. Linga, Y. Wei // *Chemical Engineering Research and Design*. — 2022. — Vol. 183. — P. 512–524.

112. Qi, Z. Numerical Investigation of the Separation Behaviours of Fine Particles in Large Dense Medium Cyclones / Z. Qi, S. B. Kuang, A. B. Yu // *International Journal of Mineral Processing*. — 2015. — Vol. 142. — P. 35–45.

113. Safikhani, H. Numerical Study of Flow Field in New Design Cyclone Separators with One, Two and Three Tangential Inlets / H. Safikhani, J. Zamani, M. Musa // *Advanced Powder Technology*. — 2018. — Vol. 29. — P. 611–622.

114. Safikhani, H. Numerical Ftudy of Flow Field in New Design Cyclones with Different Wall Temperature Profiles: Comparison with Conventional Ones / H. Safikhani, M. Rafiee, D. Ashtiani // *Advanced Powder Technology*. — 2021. — Vol. 32. — P. 3268–3277.

115. Savin, E. Modeling the Dynamics of Fine Dust Fraction in the Surface Layer of the Atmosphere / E. Savin, A. Akhmedov, A. Khoperskov // *BIO Web of Conferences*. — 2023. — Vol. 71, № 02013. — P. 1–7.

116. Stairmand, C. J. Pressure Drops in Cyclone Separators / C. J. Stairmand // *Industrial and Engineering Chemistry*. — 1949. — Vol. 16. — P. 409–411.

117. Stefanenko, I. V. Experimental Optimization of Dust Collecting Equipment Parameters of Counter Swirling Flow with Coaxial Leadthrough for Air Ventilation System and Dust Elimination / I. V. Stefanenko, V. N. Azarov, D. P. Borovkov // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. — 2019. — Vol. 224. — P. 012037. — DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012037

118. Study on the Key Structure Parameters of a Gravity Settling Chamber Based on a Flow Field Simulation / X. Liu, Y. Zhang, Q. Wu, M. Zhang, F. Liu, Y. Guo // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. — 2019. — Vol. 13:1. — P. 377–395. — DOI: 10.1080/19942060.2019.1595729

119. Tachie, M. S. DNS of Turbulent Flow in a Square Duct Roughened by Longitudinal Ribs / M. S. Tachie, W.-J. Xiong, B.-C. Wang // *Physical Review Fluids*. — 2025. — Vol. 10. — P. 114604. — DOI: 10.1103/nk2v-4cdx

120. The Optimization Problem of the Ventilation System for Metallurgical Plant / M. Butenko, Yu. Shafran, S. Khoperskov, V. Kholodkov, A. Khoperskov // *Applied Mechanics and Materials*. — 2013. — Vol. 379. — P. 167–172.

121. Theoretical Simulation of Air Circulation Inside Cyclone Mounted at Exhaust Outlet of Pneumatic Seed Drill to Optimize It / G. V. Gheorghe, M. Mateescu, C. Persu, I. Gageanu // *19<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings*. — 2018. — P. 813–817.

122. Wasilewski, M. Investigations of the Flow Phenomena Inside Square Cyclone Separators with Different Prismatic Heights / M. Wasilewski, G. Ligus, L. S. Brar // *Separation and Purification Technology*. — 2025. — Vol. 362. — P. 131724.

123. Weirich, M. Characterization of Particle Shape with an Improved 3D Light Scattering Sensor (3D-LSS) for Aerosols / M. Weirich, D. Misiulia, S. Antonyuk // *Sensors*. — 2024. — Vol. 24. — P. 955. — DOI: 10.3390/s24030955

124. Zhao, B. Experimental Investigation of Flow Patterns in Cyclones with Conventional and Symmetrical Inlet Geometries / B. Zhao // *Chemical Engineering & Technology*. — 2005. — Vol. 28 (9). — P. 969–972. — DOI: 10.1002/ceat.200500088

## **REFERENCES**

1. Azarov V.N., Borovkov D.P., Filippova S.V. The Use of Energy of Stream Turning to Decrease the Aerodynamical Resistance of Dust Collectors in Contrary Turning Stream. *Internet-vestnik VolgGASU. Seriya: Politematicheskaya* [VolgGASU Internet Bulletin. Series: Polythematic], 2012, vol. 2, p. 12.

2. Azarov V.N., Azarov D.V. *Dust Collectors with Counter-Swirling Flows*. Volgograd, Izd-vo VolgGTU, 2020. 140 p.
3. Azarov V.N. *Dust Collectors with Counter-Swirling Flows: Implementation Experience*. Volgograd, Politekhnik Publ., 2003. 136 p.
4. Azarov D.V., Borovkov D.P. About the Optimization of Swirl Parameters in the Dust Collectors VZP. *Biosfernaya sovmestimost: chelovek, region, tekhnologii* [Biosphere Compatibility: People, Region, Technologies], 2013, vol. 3, pp. 55-60.
5. Akulich A.V., Lustenkov V.M., Akulich A.A. Efficient Methods and Vortex Apparatuses for Cleaning Dust and Gas Emissions From Finely Dispersed Particles. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo universiteta prodovolstviya* [Bulletin of the Mogilev State University of Food Science], 2018, no. 1 (24), pp. 75-81.
6. Aliev T.T., Belyaev S.N., Galakhar' A.S. Modeling of a Multicomponent Gas Flow Through a Cyclone of Dust Arrester GP-628 at a Gas Purifying Area Using Ansys. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2014, vol. 10 (655), pp. 25-30.
7. Artyukhin A.S., Baev A.V., Tyurin A.S. Comparison of VZP and Cyclone Devices for Cleaning Air Emissions From Construction Industry Enterprises. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture], 2006, vol. 6, pp. 161-164.
8. Ziganshin A.M., Chernykh V.L., Logachev K.I., Sarchin R.R. Validation of the Numerical Solution of the Problem of Dusty Air Flow in a Straight Channel. *Izvestiya KGASU* [News of KSUAE], 2025, no. 2 (72), pp. 8-20. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.1
9. Vasilevsky M.V. *Dedusting of Gases Using Inertial Devices*. Tomsk, Izd-vo Tom. politekhn. un-ta, 2008. 248 p.
10. Vatin N.I., Strelets K.I. *Air Purification Using Cyclone-Type Devices*. Saint Petersburg, S.-Peterb. gos. politekhn. un-t, 2003. 65 p.
11. Nureyev A.N., Zaitseva O.N., Kamalutdinov A.M., Zhuchkova O.S. *Introduction to Computer Modeling of Hydrodynamic Processes in the OpenFOAM Software Suite*. Kazan, Izd-vo Kazan. un-ta, 2022. 84 p.
12. Shtokman E.A., Shilov V.A., Novgorodsky E.E., Skorik T.A., Amerhanov R.A. *Ventilation, Air Conditioning, and Air Purification in Food Industry Plants*. Moscow, Izd-vo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov, 2007. 632 p.
13. Vetoshkin A.G. *Dust Cleaning Processes and Equipment*. Penza, Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2005. 210 p.
14. Fadin Yu.M., Bogdanov V.S., Yuryeva M.V., Vechkanov A.V. Reverse-Flow Cyclones. Origins and Development Directions. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2017, no. 5, pp. 104-109.
15. Ganopolsky R.M., Gilmanov A.Ya. *Hydrodynamic Modeling with OpenFOAM*. Tyumen, TyumGU-Press, 2025. 160 p.
16. Goltsov A.B., Logachev K.I., Tiron O.V. *Vortex Ventilation. Swirling Recirculation, Separated Dust-Air Flows*. Belgorod, Izd-vo BGTU, 2025. 349 p.
17. Gupta A., Lilly D., Sired N. *Swirling Flows*. Moscow, Mir Publ., 1987. 588 p.
18. Danilenko N.V., Kuznetsova N.M., Romanyuk R.V. Influence of the Constructive Parameters of the Vortex Pollulator on the Hydrodynamics of the Apparatus. Vostretsova A.I., Ed. *Sovremennaya nauka: problemy, idei, tendentsii: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern Science: Problems, Ideas, Trends. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Edited by A. I. Vostretsov], 2019, pp. 55-59.
19. Demidova O.L. Numerical Simulation of Swirling Jets with Nonequilibrium Chemical Processes. *Trudy MAI* [Electronic Journal Proceedings of MAI], 2012, no. 57.
20. Zhidkov V.V., Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Logachev I.N., Dmitrienko V.G. Patterns of Powder Particle Movement in the Separation Zone of a Cylindrical Centrifugal Classifier. *Vestnik BGTU* [BSTU Bulletin], 2012, no. 1, pp. 60-65.
21. Katin V.D., Akhtyamov M.Kh., Dolgov R.V. *Modernization and Development of New Efficient Ash and Dust Collectors to Protect the Human Environment*. Moscow, Sputnik+ Publ.,

2015. 116 p.

22. Katin V.D., Akhtyamov M.Kh., Dolgov R.V. *Calculation and Selection of Rational Designs of Dust and Ash Collecting Devices*. Khabarovsk, Dalnevostoch. gos. un-t putey soobshcheniya, 2020. 150 p.

23. Knysenko Yu.V. Methodology for the Calculation and Experimental Forecast of the Efficiency of a Vortex Dust Collector. *Tekhnicheskaya mekhanika* [Technical Mechanics], 2012, vol. 4, pp. 59-66.

24. Krasovitsky Yu.V., Nikolaev V.I., Piglovsky N.V., Fedorov M.N. Design, Calculation and Aerodynamic Optimization of Vortex Dust Collectors in the Production of Building Materials. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials], 2010, vol. 5, pp. 84-87.

25. Lazarev V.A. *Cyclones and Vortex Dust Collectors*. N. Novgorod, OZON-NN, 2006. 320 p.

26. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Theoretical Physics. Hydrodynamics*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 736 p.

27. Lapin Yu.V., Garbaruk A.V., Strelets M.Kh. Algebraic Turbulence Models for Canonical Wall Flows (a Little History and Some New Results). *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU* [Scientific and Technical Bulletins of SPbSTU], 2004, no. 2, pp. 81-82.

28. Lukanin D.V. *Theoretical and Experimental Substantiation of the Performance Characteristics of Ventilation Systems with Dust Collectors on Counter-Swirling Flows*. Volgograd, Izd-vo VolgGASU, 2016. 180 p.

29. Minko V.A., Logachev I.N., Logachev K.I. *Dust-Control Ventilation*. Moscow, Teplotekhnika, 2009. 458 p.

30. Misiulia D.I., Kuzmin V.V., Markov V.A. Comparative Analysis of Technical Characteristics of Cyclone Dust Collectors. *Trudy BGTU. no. 3. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv* [Proceedings of BSTU. № 3. Chemistry and Technology of Inorganic Substances], 2012, pp. 154-163.

31. Misyulya D.I., Kuzmin V.V., Petrov O.A. Experimental and Numerical Determination of the Hydraulic Resistance of the Highly Efficient Cyclone SCN-40. *Trudy BGTU. № 3. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv* [Proceedings of BSTU. № 3. Chemistry and Technology of Inorganic Substances], 2016, vol. 3 (185), pp. 154-160.

32. Mozohin A.E. Methodology for Ensuring a Comfortable Microclimate State in a Smart Home Using an Ensemble of Fuzzy Artificial Neural Networks. *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and Automation], 2021, vol. 20 (6), pp. 1418-1447. DOI: 10.15622/ia.20.6.9

33. Motrenko D.V. Justification of Selection and Calculation of Cyclones for Air Cleaning. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State University of Railway Engineering], 2020, vol. 4 (53), pp. 77-81.

34. Nasibullin T.R., Lukyanova I.E., Mirsaev I.R. *Examples of Solving Typical Problems in the FlowVision Program*. Ufa, Ufim. gos. neftyanoy tekhn. un-t, 2017. 71 p.

35. Nikolenko S.D., Sazonova S.A., Manohin M.V. The Protection of Atmospheric Air to Ensure Safe Working Conditions at Asphalt-Concrete Plants. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya* [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physical and Chemical Problems and High Technologies in Construction Materials Science], 2016, no. 2 (13), pp. 66-75.

36. Strekalov S.D., Bogomolov S.A., Batmanov V.P., Cherevichenko E.O., Nikolenko M.A., Burlachenko O.V. Optimization of Design Parameters of Dust Collector of Counter Swirling Flows in Engineering Ecological Systems. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture], 2017, vol. 47, pp. 310-319.

37. Garbaruk A.V., Stabnikov A.S., Strelets M.Kh., Travin A.K., Shur M.L. Experience of Direct Numerical Simulation of Turbulent Boundary Layers in Complex Flows. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied Mathematics and Mechanics], 2025, vol. 89, no. 5, pp. 718-751.

38. Ostaali M.N. *Improving the Assessment of Fractional Leakage of Dust Emissions Into the Atmosphere From VZP Devices in the Production of Building Materials*. Volgograd, Izd-vo VolgGASU, 2020. 126 p.
39. Petrov V.I. *Aerohydrodynamics of Vortex Devices for Exhaust Gas Cleaning*. Kazan, KNITU, 2023. 156 p.
40. Pshenov E.A., Blyoskin S.S. Justification of Design Parameters of a Two-Stage Cyclone Vortex Funnel Using Computer Simulation. *Innovatsii i prodovolstvennaya bezopasnost* [Innovations and Food Security], 2024, no. 1 (43), pp. 175-184.
41. Chesnokov Yu.G., Likhachiev I.G., Flisyuk O.M., Martsulevich N.A., Meshalkin V.P., Garabadzhiu A.V. Calculation of Flow Hydrodynamics in Reverse-Flow Cyclones Using the Flow Vision Applied Software Package. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2022, vol. 66, no. 3, pp. 56-60. DOI: 10.6060/rcj.2022663.8
42. Rudyka E.A., Baturina E.V., Emelyanov A.B. Justification of the Choice of Cyclone in the Design of Dust Collection Systems at the Enterprises of Chemical and Food Production. *Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya* [Technologies of the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food], 2019, no. 1, pp. 64-68.
43. Sazhin B.S., Gudim L.I. Dust Collectors with Counter-Swirling Flows. *Khimicheskaya promyshlennost* [Chemical Industry], 1985, no. 8, pp. 50-54.
44. Sergina N.M. VZP Devices with Suction From the Bunker Zone in the Production of Building Materials. *Alternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative Energy and Ecology], 2013, vol. 10, pp. 43-45.
45. Skrypnik A.I. *Calculation of Characteristics of Dust Collecting Units of Ventilation Systems*. Voronezh, Voronezh. gos. arkhit.-stroit. un-t, 2004. 126 p.
46. Birger M.V., Waldberg A.Yu., Myagkov B.I., Padva V.Yu., Rusanov A.A., Urbach I.I. *Handbook of Dust and Ash Collection*. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 312 p.
47. Abdullina A.A., Zinurov V.E., Voronina L.T., Valiullin I.A. Comparison of Separation Elements of Various Shapes in a Dust Extraction Device When Cleaning Dusty Air From Food Dust. *Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [A Multi-Thematic Online Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], 2024, vol. 199, pp. 1-8.
48. Stabnikov A.S., Garbaruk A.V., Matyushenko A.A. Comparative Analysis of Algebraic Models of Laminar-Turbulent Transition. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling], 2024, vol. 36, pp. 141-157. DOI: 10.20948/mm-2024-01-09
49. Timonin A.S. *Engineering and Environmental Handbook. V. 1*. Moscow; Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2019. 917 p.
50. Khalatov A.A. *Theory and Practice of Swirling Flows*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 192 p.
51. Khrapov C.C. Numerical Modeling of Two-Dimensional Gas-Dynamic Flows in Multicomponent Nonequilibrium Media. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2025, vol. 28, no. 1, pp. 60-87. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2025.1.5
52. Goltsov A.B., Logachev K.I., Averkova O.A., Elistratova Yu.V., Seminenko A.S. Numerical Simulation of the Air Flow in an Aspiration Funnel with a Leveling Device. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo*, 2024, vol. 7, pp. 64-75. DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012037
53. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Tiron O.V., Averkova O.A., Popov E.N., Uvarov V.A., Goltsov A.B. Numerical Determination of the Boundaries of Vortex Zones at the Inlet to the Round Exhaust Hood Above the Plane. *Stroitelstvo i tekhnogennaya bezopasnost* [Construction and Industrial Safety], 2022, vol. 1, pp. 251-260.
54. Shaptala V.G., Shaptala V.V. *Mathematical and Computer Modeling of Dust Removal in the Production of Building Materials: Monograph*. Belgorod, Izd-vo BGTU, 2017. 163 p.
55. Shaptala V.G., Shaptala V.V. Modeling of Gas Cleaning in Dust Settling Chambers of Cement Kilns. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University Named After

V.G. Shukhov], 2017, no. 4, pp. 132-137.

56. Shuktomova A.G., Shaimukhmetova A.Sh., Kuznetsov M.G. Numerical Modeling of Particle Capture in a Cyclone Separator. *Politematicheskiiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [A Multi-Thematic Online Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], 2024, no. 203, pp. 415-422.

57. Baxodirova M.T., Kurbonov D., Badalov A.A., Jurayev R.R., Bekturdiyev G.K., Mahamatjanov M.A. Efficiency and Pressure Loss in Apparatus with Swirling Flow. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitelstva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova* [Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov], 2022, vol. 2-1, no. 76, pp. 320-325.

58. Song G., Ai Z., Liu Z., Zhang G. A Systematic Literature Review on Smart and Personalized Ventilation Using CO<sub>2</sub> Concentration Monitoring and Control. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 7523-7536.

59. Alsamrai O., Redel-Macias M.D., Pinzi S., Dorado M.P. A Systematic Review for Indoor and Outdoor Air Pollution Monitoring Systems Based on Internet of Things. *Sustainability*, 2024, vol. 16, pp. 4353. DOI: 10.3390/su16114353

60. Ajarostaghi S.S.M., Mousavi S.S., Bhojaraju C. Numerical Investigation the Effects of Cone Diameters on the Flow Pattern and Separation Efficiency in a Cyclone Separator. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2023, vol. 1149, pp. 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/1149/1/0120051

61. Alexander R.M. Fundamentals of Cyclone Design and Operation. *Proceedings of Australian Institute of Mining Metallic Processes*, 1949, vol. 152, pp. 203-228.

62. Xie B., Li S., Jin H., Hu S., Wang F., Zhou F. Analysis of the Performance of a Novel Dust Collector Combining Cyclone Separator and Cartridge Filter. *Powder Technology*, 2018, vol. 339, pp. 695-701. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.103

63. Ayl E., Kocak E. A Comprehensive Review of Cyclone Separator Technology. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2025, vol. 103, pp. 2751-2789. DOI: 10.1002/cjce.25526

64. Azarov V.N., Borovkov D.P., Redhwan A.M. Application of Swirling Flows in Aspiration Systems. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 2014, vol. 8, pp. 750-753.

65. Azarov V.N., Borovkov D.P., Redhwan A.M. Experimental Study of Secondary Swirling Flow Influence on Flows Structure at Separation Chamber Inlet of Dust Collector with Countercurrent Swirling Flows. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 2014, vol. 8, pp. 851-856. DOI: 10.15866/ireme.v8i5.3455

66. Bogdanov D., Poniaev S. Numerical Simulation of Turbulent Flow in a Cyclonic Separator. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 572, pp. 012056. DOI: 10.1088/1742-6596/572/1/012056

67. Browne J.M., Strauss W. Pressure Drop Reduction in Cyclones. *Atmospheric Environment*, 1967, vol. 12, pp. 1213-1221.

68. Romanova D., Ivanov O., Trifonov V., Ginzburg N., Korovina D., Ginzburg B., Koltunov N., Eglit M., Strijhak S. Calibration of the  $k - \omega$  SST Turbulence Model for Free Surface Flows on Mountain Slopes Using an Experiment. *Fluids*, 2022, vol. 7, pp. 111.

69. Casal J., Martinez-Benet J.M. A Better Way to Calculate Cyclone Pressure Drop. *Chemical Engineering*, 1983, vol. 99, pp. 100-111.

70. Paganel T.V., Alban E.F., Cyrille M.A., Abbe C.V.N. CFD Simulation of an Industrial Dust Cyclone Separator: A Comparison with Empirical Models: The Influence of the Inlet Velocity and the Particle Size on Performance Factors in Situation of High Concentration of Particles. *Journal of Engineering*, 2024, vol. 2024, pp. 1-31. DOI: 10.1155/2024/5590437

71. Coker A.K. Understand Cyclone Design. *Chemical Engineering Progress*, 1993, vol. 89, pp. 51-55.

72. Izzah C.I.N., Yunardi, Reza M., Sylvia N., Malahayati N., Mulana F., Fairweather M. Comparative Assessment of Turbulence Models for Predicting Square Cyclone Separator Performance. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2025,

vol. 127, no. 1, pp. 140-160.

73. Nur Malahayati, Darmadi D., Putri CutAlisa, Mairiza L., Rinaldi W., Yunardi Y. Comparative Performance Analysis Between Conventional and Square Cyclones for Solid Particle-Gas Separation: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 63, pp. 318-325. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.157

74. Vegini A.A., Meier H.F., Iess J.J., Mori M. Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of Cyclone Separators Connected in Series. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, vol. 47, no. 1, pp. 192-200.

75. Shepherd C.B., Lapple C.E. Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1939, vol. 91, no. 8, pp. 972-984. DOI: 10.1021/ie50356a012

76. Dehdarinejad E., Bayareh M. Performance Analysis of a Novel Cyclone Separator Using RBFNN and MOPSO Algorithms. *Powder Technology*, 2023, vol. 426, p. 118663. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118663

77. Dirgo J. *Relationships Between Cyclone Dimensions and Performance*. Cambridge, Harvard University, 1988. 250 p.

78. Dziubak T. Theoretical and Experimental Studies of Uneven Dust Suction From a Multi-Cyclone Settling Tank in a Two-Stage Air Filter. *Energies*, 2021, vol. 14, pp. 8396. DOI: 10.3390/en14248396

79. Ithape P.K., Barve S.B., Pande S.S., Nadgire A.R. Effect of Geometric Parameters on the Performance of Cyclone Separator Using CFD. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2017, vol. 7, pp. 288-292.

80. Yang X., Yang J., Wang S., Zhao Y. Effects of Operational and Geometrical Parameters on Velocity Distribution and Micron Mineral Powders Classification in Cyclone Separators. *Powder Technology*, 2022, vol. 407, pp. 117609. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117609

81. Wanga S., Lia H., Wanga R., Wanga X., Tian R., Sun Q. Effect of the Inlet Angle on the Performance of a Cyclone Separator Using CFD-DEM. *Advanced Powder Technology*, 2019, vol. 30, pp. 227-239. DOI: 10.1016/j.appt.2018.10.027

82. Fu S., Tao L., Shen Z., Xu M., Yanga D., Hu Y., Zhou F. Effects of Helical Guide Vanes on Droplet Behavior and Separation Performance in Cyclone Separators. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2025, vol. 209, pp. 110197.

83. El-Emam M.A., Zhou L., Omara A.I. Predicting the Performance of Aero-Type Cyclone Separators with Different Spiral Inlets Under Macroscopic Bio-Granular Flow Using CFD-DEM Modelling. *Biosystems Engineering*, 2023, vol. 233, pp. 125-250.

84. Zhang T., Guo K., Liu C., Li Y., Tao M., Chong S. Experimental and Numerical Investigations of a Dual-Stage Cyclone Separator. *Chemical Engineering & Technology*, 2018, vol. 41, pp. 606-617. DOI: 10.1002/ceat.201700052

85. Chlebnikovas A., Paliulis D., Kilikeviciene K., Kilikevicius A. Experimental Research of Gaseous Emissions Impact on the Performance of New-Design Cylindrical Multi-Channel Cyclone with Adjustable Half-Rings. *Sustainability*, 2022, vol. 14. DOI: 10.3390/su14020902

86. Fatahian H., Fatahian E., Erfani R. Square Cyclone Separator: Performance Analysis Optimization and Operating Condition Variations Using CFD-DPM and Taguchi Method. *Powder Technology*, 2023, vol. 428, pp. 118789.

87. Sayed M., Dehbi A., Niceno B., Mikityuk K., Krinner M. Flow Simulation of Gas Cyclone Separator at High Reynolds Number Using the Elliptic-Relaxation Hybrid LES/RANS (ER-HRL) Model. *6<sup>th</sup> World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT 21)*, 2021 DOI: 10.11159/icmfht21.lx.110

88. Aksenov A.A., Kharchenko S.A., Konshin V.N., Pokhilko V.I. FlowVision Software: Numerical Simulation of Industrial CFD Applications on Parallel Computer Systems. *Parallel Computational Fluid Dynamics 2003*, 2004, pp. 401-408. DOI: 10.1016/B978-044451612-1/50051-2

89. Golestaneh S.M., Toghraie D. Separation of Particles From the Gas by Using of Cyclonic Separation in the Cyclotubes of Scrubber Installed in Gas Compressor Station. *Powder Technology*, 2019, vol. 343, pp. 392-421. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.068

90. Cao G., Sun J., Sun G., Zhou F., Fu S. Influence of a Spiral Guide Vane on the Flow

Field and Particle Deposition Outside the Vortex Finder of FCC Disengager Cyclone Separators. *Energy*, 2025, vol. 337, pp. 138593.

91. Iozia D.L., Leith D. The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency. *Aerosol Science and Technology*, 1990, vol. 12, pp. 598-606.

92. Jiao J., Liu Z., Zheng Y. Evaluations and Modifications on Reynolds Stress Model in Cyclone Simulations. *Chemical Engineering & Technology*, 2007, vol. 30, pp. 15-20.

93. Kosygin V., Katin V., Zhuravlev A. Mathematical Modelling of Dust-Gas Flow in Dust Collection Cyclones and Optimization of Their Parameters. *E3S Web of Conferences*, 2025, vol. 646. DOI: 10.1051/e3sconf/202564600025

94. Kourou A., Chen S., Ouyang Y. Gas-Liquid and Liquid-Liquid Vortex Technology for Process Intensification. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2024, vol. 46, pp. 101056. DOI: 10.1016/j.coche.2024.101056

95. Kuzmin V.V. Selecting the Most Economical Cyclone Standard Size. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2023, vol. 58, pp. 798-805. DOI: 10.1007/s10556-023-01164-x

96. Le D.K., Yoon J.Y. Numerical Investigation on the Performance and Flow Pattern of Two Novel Innovative Designs of Four-Inlet Cyclone Separator. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2020, vol. 150, pp. 107867. DOI: 10.1016/j.cep.2020.107867

97. Logachev I.N., Logachev K.I. *Industrial Air Quality and Ventilation: Controlling Dust Emissions*. CRC Press, 2014. 393 p.

98. Nicolas-Perez F., Velasco F.J.S., Oton-Martinez R.A., Garcia-Cascales J.R., Bentaib A., Chaumeix N. Mathematical Modelling of Turbulent Combustion of Two-Phase Mixtures of Gas and Solid Particles with a Eulerian-Eulerian Approach: The Case of Hydrogen Combustion in the Presence of Graphite Particles. *Mathematics*, 2021, vol. 9 DOI: <https://doi.org/10.3390/math9172017>

99. Misiulia D., Liden G., Antonyuk S. Cyclone Dimensionless Pressure Drop, Cut Size, and Separation Slope: One Dimensionless Number (Reynolds) to Rule Them All. *Particuology*, 2024, vol. 95, pp. 235-251.

100. Misiulia D., Andersson A.G., Lundstrom T.S. Effects of the Inlet Angle on the Flow Pattern and Pressure Drop of a Cyclone with Helical-Roof Inlet. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, vol. 102, pp. 307-321.

101. Modabberifar M., Nazaripoora H., Safikhani H. Modeling and Numerical Simulation of Flow Field in Three Types of Standard New Design Cyclone Separators. *Advanced Powder Technology*, 2021, vol. 32, pp. 4295-4302.

102. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab. Fluid Mechanics and Its Applications*. Springer, 2015. 791 p.

103. Noori S., Saidi M. Numerical Simulation of Gas-Solid Flow in a Cyclone Separator with Additional Inlet. *Engineering Research Express*, 2024, vol. 6, pp. 015045. DOI: 10.1088/2631-8695/ad1d8c

104. Madaliev M., Usmonov M., Kadyrov K., Abdullajonov N., Mavlonova D., Otakhanova Z., Muminov K. Numerical Analysis of Aingle SC-50-800 and SC-50-500x2-X4 Group Centrifugal Cyclones: Efficiency Comparison. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 508, p. 06005. DOI: 10.1051/e3sconf/202450806005

105. Gao Z.-W., Liu Z.-X., Wei Y.-D., Li C.-X., Wang S.-H., Qi X.-Y., Huang W. Numerical Analysis on the Influence of Vortex Motion in a Reverse Stairmand Cyclone Separator by Using LES Model. *Petroleum Science*, 2022, vol. 19, pp. 848-860.

106. Logachev K.I., Popov E.N., Kozlov T.A., Ziganshin A.M., Gao R., Averkova O.A., Tiron O.V. Numerical and Experimental Studies of Airflows at Exhaust Hoods with Inlet Extensions. *Building and Environment*, 2024, vol. 261, p. 111753.

107. Averkova O.A., Logachev K.I., Kozlov T.A., Popov E.N., Dmitrienko V.G. Numerical Calculation of the Boundaries of Vortex Zones at the Inlet to Round Exhaust Hoods with Three Shelves. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2023, vol. 63, pp. 681-686.

108. Savin E.S., Kuzmich A.S., Startseva J.V., Titov A.V., Khoperskov A.V. Numerical Models of Ventilation Systems for Cement Manufacturing Facility Based on Hydrodynamic Simulation. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2410, p. 020023. DOI: 10.1063/5.0067647

109. Xu H., Zhang P., Gu F., Hu Z., Yang H., Mao E., Du Y. Numerical Simulation and Experiment of Dust Suppression Device of Peanut Whole-Feed Combine Using Computational Fluid Dynamics. *Agriculture*, 2023, vol. 13, p. 329. DOI: 10.3390/agriculture13020329
110. Madaliev M., Abdulkhaev Z., Khusanov Y., Mirzababayeva S., Abobakirova Z. Numerical Study of Highly Efficient Centrifugal Cyclones. *Acta Hydrotechnica*, 2025, pp. 143-157. DOI: 10.15292/acta.hydro.2024.08
111. Gao Z., Liua Z., Songb Z., Lia C., Qia X., Linga H., Wei Y. Peculiarities of Particle Motion Inside Cyclone Separator by Using LES-DRW Model. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 183, pp. 512-524.
112. Qi Z., Kuang S.B., Yu A.B. Numerical Investigation of the Separation Behaviours of Fine Particles in Large Dense Medium Cyclones. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, vol. 142, pp. 35-45.
113. Safikhani H., Zamani J., Musa M. Numerical Study of Flow Field in New Design Cyclone Separators with One, Two and Three Tangential Inlets. *Advanced Powder Technology*, 2018, vol. 29, pp. 611-622.
114. Safikhani H., Rafiee M., Ashtiani D. Numerical Ftudy of Flow Field in New Design Cyclones with Different Wall Temperature Profiles: Comparison with Conventional Ones. *Advanced Powder Technology*, 2021, vol. 32, pp. 3268-3277.
115. Savin E., Akhmedov A., Khoperskov A. Modeling the Dynamics of Fine Dust Fraction in the Surface Layer of the Atmosphere. *BIO Web of Conferences*, 2023, vol. 71, no. 02013, pp. 1-7.
116. Stairmand C.J. Pressure Drops in Cyclone Separators. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1949, vol. 16, pp. 409-411.
117. Stefanenko I.V., Azarov V.N., Borovkov D.P. Experimental Optimization of Dust Collecting Equipment Parameters of Counter Swirling Flow with Coaxial Leadthrough for Air Ventilation System and Dust Elimination. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 224, p. 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012037
118. Liu X., Zhang Y., Wu Q., Zhang M., Liu F., Guo Y. Study on the Key Structure Parameters of a Gravity Settling Chamber Based on a Flow Field Simulation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2019, vol. 13:1, pp. 377-395. DOI: 10.1080/19942060.2019.1595729
119. Tachie M.S., Xiong W.-J., Wang B.-C. DNS of Turbulent Flow in a Square Duct Roughened by Longitudinal Ribs. *Physical Review Fluids*, 2025, vol. 10, p. 114604. DOI: 10.1103/nk2v-4cdx
120. Butenko M., Shafran Yu., Khoperskov S., Kholodkov V., Khoperskov A. The Optimization Problem of the Ventilation System for Metallurgical Plant. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 167-172.
121. Gheorghe G.V., Mateescu M., Persu C., Gageanu I. Theoretical Simulation of Air Circulation Inside Cyclone Mounted at Exhaust Outlet of Pneumatic Seed Drill to Optimize It. *19<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings*, 2018, pp. 813-817.
122. Wasilewski M., Ligus G., Brar L.S. Investigations of the Flow Phenomena Inside Square Cyclone Separators with Different Prismatic Heights. *Separation and Purification Technology*, 2025, vol. 362, p. 131724.
123. Weirich M., Misiulia D., Antonyuk S. Characterization of Particle Shape with an Improved 3D Light Scattering Sensor (3D-LSS) for Aerosols. *Sensors*, 2024, vol. 24, p. 955. DOI: 10.3390/s24030955
124. Zhao B. Experimental Investigation of Flow Patterns in Cyclones with Conventional and Symmetrical Inlet Geometries. *Chemical Engineering & Technology*, 2005, vol. 28 (9), pp. 969-972. DOI: 10.1002/ceat.200500088

## REVIEW OF COMPUTATIONAL MODELS FOR CYCLONE-TYPE DUST COLLECTORS

**Egor S. Savin**

Postgraduate Student, Department of Information Systems  
and Computer Modeling,  
Volgograd State University  
e.s.savin@volsu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-7915-121X>  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Alexander V. Khoperskov**

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Head of the Department of Information  
Systems and Computer Modeling,  
Volgograd State University  
khoperskov@volsu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0149-7947>  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The problem of gas separation from aerosols and dust particles is relevant for a wide variety of industries. This review focuses on certain aspects of the operation of cyclone-type dust collectors, which are widely used for separating solid particles and gas. First, we describe some of the capabilities of computational fluid dynamics for analyzing the operation of dust collectors that generate swirling flows within the apparatus. This can ensure efficient separation of gas and dust due to centrifugal force. The results of numerical modeling of gas and dust component dynamics are discussed, depending on the internal geometry of the chamber, the characteristics of the gas inlet and outlet channels, the gas inflow velocity, and other factors. Computational experiments can form the basis for solving optimization problems in the design of various cyclone types. Cyclone operating conditions with inflow velocities of 5–30 m/sec generate developed turbulence with typical pulsation velocities of 0.3–1.5 m/sec. Thus, flow structure is largely determined by turbulence and the corresponding turbulent viscosity. Analysis of gas-dynamic simulation results using different turbulence models (TMs) reveals the strong sensitivity of flow structure and separation efficiency to the choice of TM. This poses the challenge of selecting a dust collector for a specific design and operating conditions for collecting dust particles. Computational fluid dynamics models enable effective optimization of dust collectors, selecting designs with higher gas and particle separation efficiency and limited pressure drop in the system.

**Key words:** cyclone dust collectors, computational fluid dynamics, turbulence, hydraulic resistance, dust particle dynamics, separation efficiency.