

*А.В. Иванов, Г.Е. Думнов, А.В. Муслаев, кандидаты техн. наук, М.В. Попов
(Ментор Графикс Девелопмент Сервисез Лимитед, г. Москва, Россия).
E-mail: Andrey_Ivanov@mentor.com*

Использование программных средств численного моделирования для расчета аэродинамических характеристик воздушных циклонов

Воздушные циклоны — пространственные пылеулавливающие аппараты во многих отраслях промышленности, что обусловлено простотой конструкции, отсутствием движущихся частей, низкими капитальными и эксплуатационными затратами в сочетании с высокой эффективностью очистки воздуха.

Несмотря на простоту конструкции и принцип работы, картина движения воздуха внутри циклона осложняется высоким уровнем турбулентности, сильной анизотропией, выраженной трехмерностью и нестационарностью вращающегося воздушного потока. Из-за отсутствия устоявшейся теории движения сред в циклоне при создании новых конструкций разработчики вынуждены опираться либо на эмпирические методики, либо идти по пути незначительных модификаций существующих схем. По этой причине при доводке и оптимизации конструкции неизбежны дорогостоящие стендовые испытания опытных образцов.

В этих условиях средства моделирования, основанные на методах вычислительной гидродинамики и тепломассообмена (Computational Fluid Dynamics — CFD) — полезный инструмент для расчета характеристик циклонов. CFD позволяет лучше понять сложную структуру полей течения и получить информацию по следующим вопросам: гидравлическое сопротивление циклона и его зависимости от определенных конструктивных решений и условий эксплуатации; устойчивость центрального вихря и его возможное взаимодействие со стенками конической части цикло-

на; количественная и качественная оценка эрозионного воздействия на стенки циклона; степень очистки воздуха (эффективности циклона).

Одна из основных проблем при анализе результатов численного моделирования — их адекватность реальной картине физического явления или технологического процесса. В настоящей работе для решения этой задачи сопоставляются результаты численного моделирования основных характеристик циклонов с имеющимися экспериментальными данными.

В качестве объекта моделирования выбран цилиндрический воздушный циклон с входным патрубком прямоугольного сечения для тангенциального подвода газа. В работе описывается нестационарное трехмерное турбулентное течение вязкого сжимаемого неоднородного потока воздуха, переносащего вещество (твердую примесь в виде сферических частиц). Математиче-

ская формулировка задачи включает трехмерные нестационарные дифференциальные уравнения сохранения массы турбулентного воздушного потока, его импульса и энергии, а также характеристик турбулентности. Для моделирования переноса твердой примеси использовали траекторный подход. Предполагается, что твердая примесь не влияет на поле течения в циклоне. С учетом известных допущений система дифференциальных уравнений сохранения может быть представлена в виде

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U} \Phi) = \nabla(\vec{\Psi}_{\Phi}) + S_{\Phi}, \quad (1)$$

где ρ — плотность воздуха; Φ — зависимая переменная; t — время; \vec{U} — вектор скорости; $\vec{\Psi}_{\Phi}$ — диффузионный поток; S_{Φ} — источник член.

Все зависимые переменные, а также соответствующие коэффициенты переноса и источник члены приведены в табл. 1.

Таблица 1

Φ	$\vec{\Psi}_{\Phi}$	S_{Φ}
1	0	0
\vec{U}	$\vec{\tau} \Sigma$	$-\nabla P' + (\rho - \rho_{ref}) \vec{g}$
H	$\vec{U} \vec{\tau} \Sigma + (\lambda + \lambda_t) \nabla T + \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k$	0
k	$\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k$	$\vec{\tau} R_{\nabla}(\vec{U}) - \rho \varepsilon$
ε	$\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \nabla \varepsilon$	$f_1 C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \vec{\tau} R_{\nabla}(\vec{U}) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$

Здесь

$$P' = P - P_{ref} - \rho_{ref} \bar{g} \bar{x} + \frac{2}{3} \rho k;$$

$$\bar{\tau}^{\Sigma} = (\mu + \mu_t) \bar{s}; \quad \bar{\tau}^R = \mu_t \bar{s} - \frac{2}{3} \rho k I;$$

$$\bar{s} = \nabla(\bar{U}) + (\nabla \bar{U})^T - \frac{2}{3} \nabla(\bar{U}) I;$$

$$H = h + \frac{\bar{U}^2}{2} + \frac{5}{3} k; \quad h = c_p T;$$

$$\mu_t = C_{\mu} f_{\mu} \frac{\rho k^2}{\varepsilon};$$

$$f_{\mu} = (1 - \exp(-0,0165 R_y))^2 \left(1 + \frac{7,5}{R_t}\right);$$

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_{\mu}}\right)^3; \quad f_2 = 1 - \exp(-R_t^2);$$

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}; \quad R_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon},$$

где $\bar{\tau}^{\Sigma}$ — тензор суммарных напряжений; P' — эффективное давление; ρ_{ref} — референсная плотность воздуха; \bar{g} — ускорение свободного падения; H — полная удельная энтальпия; λ — коэффициент теплопроводности; λ_t — коэффициент турбулентной теплопроводности; T — температура; μ — динамический коэффициент молекулярной вязкости; μ_t — динамический коэффициент турбулентной вязкости; σ_k — константа; k — кинетическая энергия турбулентных пульсаций; $\bar{\tau}^R$ — тензор Рейнольдсовых напряжений; ε — скорость диссипации кинетической энергии турбулентных пульсаций; σ_{ε} , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ — константы; f_1, f_2 — демпфирующие функции; P — статическое давление; P_{ref} — референсное давление; \bar{x} — радиус-вектор; \bar{s} — тензор сдвиговых деформаций; I — единичный тензор; h — удельная энтальпия; c_p — удельная теплоемкость воздуха; C_{μ} — константа; f_{μ} — демпфирующая функция Lam-Bremhorst; R_y, R_t — безразмерные комплексы; y — минимальное расстояние до стенки.

Плотность воздуха вычислена из уравнения состояния для совершенного газа. Динамический коэффициент молекулярной вязкости и коэффициент теплопроводности воздуха зависят от температуры. Для замыкания системы уравнений сохранения использовалась k - ε мо-

дель турбулентности в модификации Lam-Bremhorst. Константы модели турбулентности имеют следующие значения: $C_{\mu} = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1$; $\sigma_{\varepsilon} = 1,3$ [1].

Траектории твердых частиц смеси определены путем численного интегрирования уравнения

$$m_p \frac{d\bar{U}_p}{dt} = \frac{1}{8} \pi \mu d C_D (\bar{U} - \bar{U}_p) + \frac{1}{6} \pi d^3 (-\nabla P + (\rho_p - \rho) \bar{g}), \quad (2)$$

где m_p — масса частицы; \bar{U}_p — вектор скорости частицы; d — диаметр частицы; C_D — коэффициент сопротивления частиц; ρ_p — плотность частицы. Коэффициент сопротивления частиц рассчитан по формулам Хендерсона [2]. Теплообмен между частицами и потоком газа не рассматривался. Граничные условия для рассматриваемого объекта моделирования включают задание объемного или массового расхода воздуха на входном патрубке циклона. Нулевое избыточное давление задавалось на внешних границах расчетной области для внешней постановки задачи, и на выходе из выхлопной трубы циклона для внутренней постановки задачи. Выбор типа постановки зависит от геометрических особенностей циклона (рассмотрен ниже).

Для описания вязкого взаимодействия турбулентного воздушного потока со стенками применен метод пристеночных функций в совокупности с оригинальной моделью, базирующейся на подсеточном разрешении пограничного слоя. Эта модель — система интегро-дифференциальных

уравнений, решаемых вдоль пристеночных линий тока и позволяющих определить толщину пограничного слоя, напряжения трения и тепловые потоки на гладких и шероховатых поверхностях. Уникальность описанного подхода — возможность получения пристеночных напряжений и тепловых потоков во всем диапазоне чисел Рейнольдса (начальное задание режима течения необязательно) [1].

Приведенная система дифференциальных уравнений сохранения решена численно на прямоугольной декартовой сетке с применением неявной конечно-разностной схемы при использовании концепции «контрольного объема».

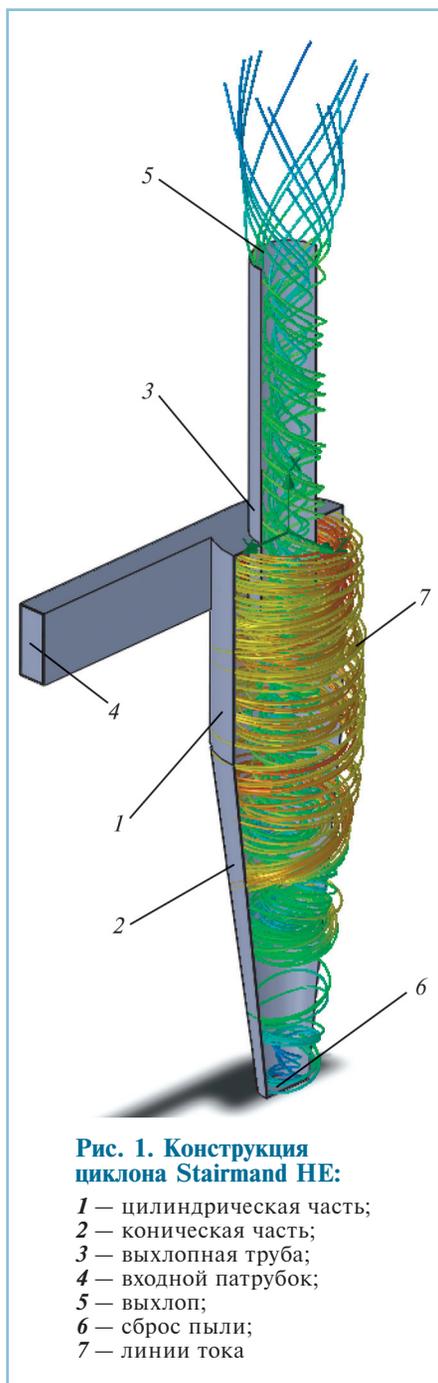
Расчеты проведены в среде коммерческого вычислительного программного комплекса FloEFD [1] версии 11.3 на персональном компьютере PC Dell Precision T3500 Intel Xeon 4 CPU E5530 2.4 GHz 6.0 Gb RAM. Время расчета одного варианта — ~6 ч. FloEFD полностью интегрирован в трехмерные твердотельные CAD системы (SolidWorks, Creo, CATIA, NX), что позволяет проводить расчеты течения жидкостей и газов непосредственно в среде разработки и проектирования оборудования.

Для проверки адекватности математического моделирования течения в циклоне выбраны экспериментальные работы, выполненные на двух разных установках [3, 4].

1. Циклон Stairmand HE. Геометрия циклона и характерная картина течения в нем показаны на рис. 1. Основные размеры циклона Stairmand HE приведены в табл. 2 [3].

Таблица 2

Геометрический размер, м	Значение
Общая высота (цилиндрическая и коническая части)	1,22
Высота (диаметр) цилиндрической части	0,457 (0,305)
Диаметр выхлопной трубы	0,152
Длина верхней (нижней) части выхлопной трубы	0,6 (0,152)
Длина (ширина) прямоугольного сечения входного патрубка	0,152 (0,061)
Длина входного патрубка	0,6
Диаметр отверстия для сброса пыли	0,114



В экспериментах [3] исследовались различные режимы работы циклона (массовый расход воздуха: 0,06...0,30 кг/с; входная скорость: 5...25 м/с). Плотность воздуха — 1,29 кг/м³, динамическая вязкость — 1,75E-5 Па·с.

Задача расчета течения внутри циклона рассмотрена во внешней постановке во избежание необходимости задавать неравномерный профиль статического давления на выходе из выхлопной трубы. Зада-

ние постоянного значения давления на выходе из трубы является некорректным при решении задач с сильно закрученными потоками во внутренней постановке.

Таким образом, в расчетную область включены внутреннее пространство циклона и часть окружающего пространства. Размеры области моделирования: длина — 0,817 м, ширина — 0,44 м, высота — 2,25 м. Отверстие для сброса частиц в эксперименте и в расчете было закрыто.

Для дискретизации расчетной области во FloEFD использована неструктурированная прямоугольная декартова сетка, адаптированная к реальной форме тел. Данная сетка получается дроблением (в соответствии со специальными настройками) базовой структурированной декартовой сетки.

Задача решалась в нестационарной постановке с постоянным шагом по времени. Цель расчетов — вычисление перепада полного давления между входным патрубком и выхлопом с последующим сравнением полученных данных с

экспериментальными значениями. Искомый перепад давления усреднялся после выхода этой величины на квазистационарный режим.

II. Циклон с бункером. В отличие от циклона Stairmand HE, экспериментальные данные по циклону с бункером отличаются большим разнообразием режимов и температур, и включают в себя оценку эффективности работы [4]. Геометрия циклона показана на рис. 2. Основные размеры циклона приведены в табл. 3 [4].

Данный циклон отличается от циклона Stairmand HE наличием бункера и устройства для спрямления потока на конечном участке выхлопной трубы. Это устройство позволяет получить на выходе практически однородный поток, поэтому нет необходимости решать задачу во внешней постановке — постоянное значение статического давления на выхлопе — вполне корректное граничное условие для внутренней постановки задачи.

Размеры расчетной области равны габаритным размерам циклона.

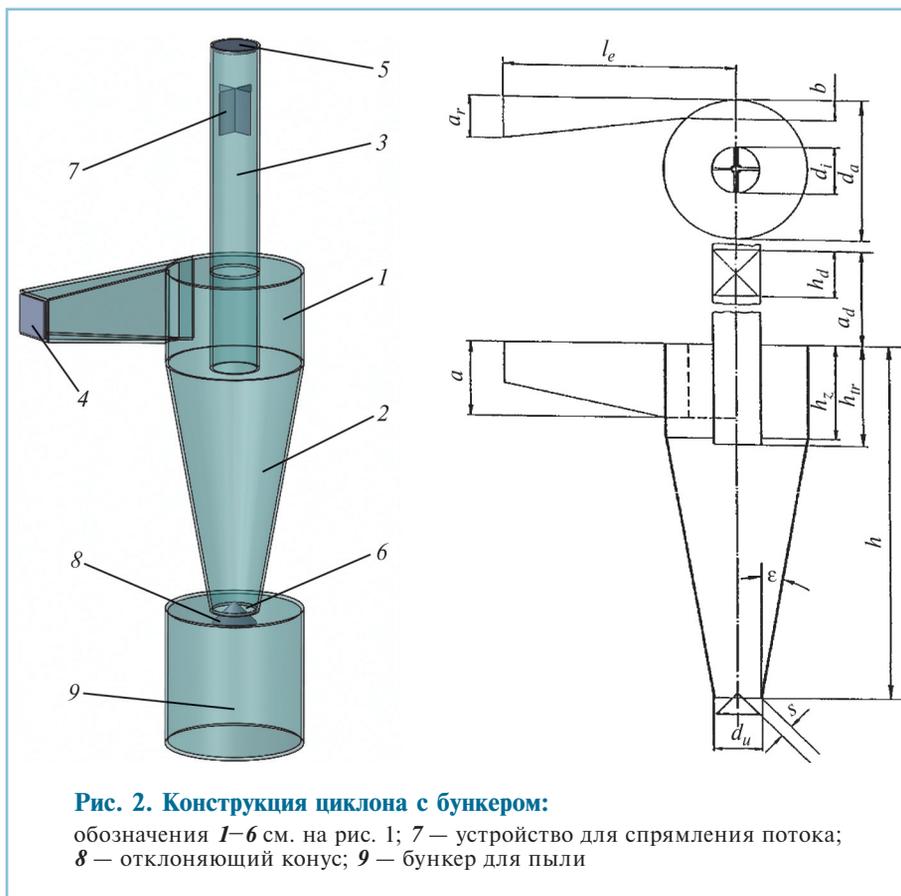


Таблица 3

Геометрический размер	Значение
Диаметр цилиндрической части d_c , м	0,15
Диаметр выхлопной трубы d_p , м	0,05
Диаметр отверстия для сброса пыли d_w , м	0,05
Высота циклона h , м	0,387
Длина входного патрубка l_e , м	0,245
Высота входного патрубка при входе в циклон a , м	0,02
Ширина входного патрубка при входе в циклон b , м	0,08
Высота цилиндрической части h_z , м	0,104
Длина нижней части выхлопной трубы h_{nr} , м	0,11
Длина верхней части выхлопной трубы a_d , м	0,21
Высота устройства для спрямления потока h_d , м	0,05
Длина стороны квадратного сечения входного патрубка a_r , м	0,044
Ширина зазора s , м	0,01
Угол наклона конической части ε , град	10

Для ее дискретизации использовались те же подходы, что и для циклона Stairmand HE. Расчетная сетка с 350 тыс. контрольных объемов использовалась в качестве основной для расчетов этого циклона. Применялись те же расчетные методы и процедуры усреднения перепада давления, как и для циклона Stairmand HE.

Для выборочных режимов работы также оценена эффективность работы циклона — проведен расчет движения и осаждения частиц различного диаметра. Плотность материала частиц принята равной 2650 кг/м^3 .

Предполагалось, что на внутренних поверхностях циклона выполняется условие идеального отражения частиц. Внутренние поверхности бункера трактуются как поверхности с полным поглощением.

Со входного патрубка выпускалось по 500 частиц каждого диаметра в интересующем диапазоне размера частиц. Далее проводился расчет траектории каждой частицы с учетом приведенных граничных условий. Эффективность циклона определялась как отношение количества уловленных частиц пыли

каждого диаметра к общему количеству выпущенных частиц этого диаметра.

В научно-технической литературе сформировалось скептическое отношение к использованию k - ε модели турбулентности и ее модификаций для моделирования течения в закрученных потоках, в том числе и в циклонах [5]. Не ставя под сомнение правомерность таких оценок для локальных характеристик, попытаемся продемонстрировать полезность k - ε модели в инженерных расчетах интегральных характеристик циклонов.

Выделим три методических момента успешного применения k - ε модели турбулентности для расчета течения в циклонах.

1. В случае наличия на выходе из циклона потока с выраженной тангенциальной составляющей рекомендуется решать задачу во внешней постановке. При наличии на выходе разного рода устройств для спрямления потока этот момент перестает быть принципиальным.

2. Требования к расчетной сетке: внутри циклона рекомендуется избегать ячеек с разными уровнями дробления, предпочтительнее однородный уровень дробления, особенно в областях с высокой интенсивностью закрутки.

3. Нестационарный расчет с постоянным шагом по времени дает более правильный результат расчета гидравлического сопротивления [6]. Величина временного шага — критически важное звено для получения удовлетворительного результата. Поэтому его величина не должна превышать некоторое критическое значение

$$\Delta t_{\text{кр}} = \frac{\min(D_{\text{п}}, D_{\text{вт}})}{U_{\text{макс}}} = \frac{\min(D_{\text{п}}, D_{\text{вт}})}{U_{\text{вх}}} D_{\text{вт}}, \quad (3)$$

где $\Delta t_{\text{кр}}$ — критический шаг по времени; $D_{\text{п}}$ — диаметр отверстия для сброса пыли; $D_{\text{вт}}$ — диаметр выхлопной трубы; $U_{\text{макс}}$ — максимальная скорость воздуха в циклоне;

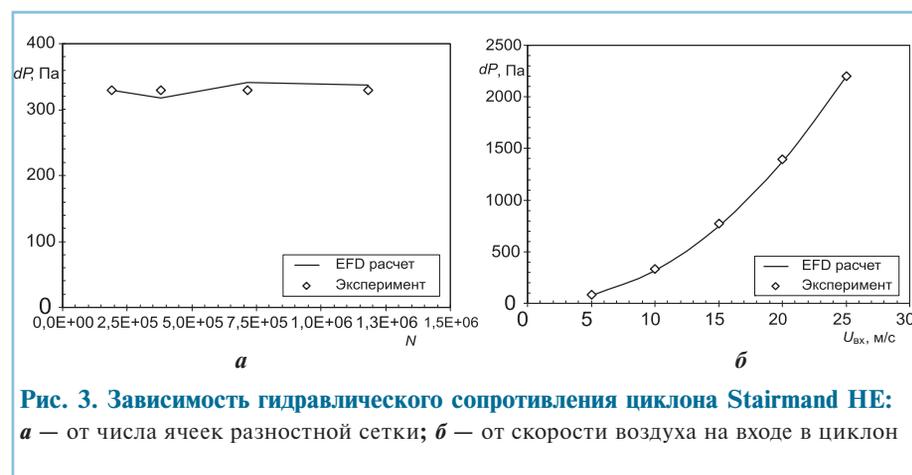


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления циклона Stairmand HE: а — от числа ячеек разностной сетки; б — от скорости воздуха на входе в циклон

$D_{ц}$ — диаметр цилиндрической части; $U_{вх}$ — скорость воздуха на входе во входной патрубок.

Авторы не претендуют на универсальность этих методических рекомендаций для любых математических моделей течения и алгоритмов их реализации. Возможно, что эти положения справедливы в основном для пакета FloEFD. Тем не менее, их использование может оказаться полезным и в рамках других CFD пакетов.

Результаты расчетов гидравлического сопротивления циклона Stairmand HE в зависимости от числа ячеек разностной сетки и результаты физического эксперимента [3] показаны на **рис. 3, а**. Шаг по времени оценивали в соответствии с (3) и, например, для входной скорости 10 м/с принимали равным 0,005 с. Число итераций для выхода на квазистационарный режим менялось от 1000 до 2000 в зависимости от производительности циклона. Расчеты показали хорошую точность (в пределах 5 %) и слабовыраженную чувствительность результатов к изменению количественных параметров расчетной сетки. Расчетная сетка с числом ячеек 380 тыс. выбрана в качестве базовой для всех расчетов этого циклона.

График на **рис. 3, б** демонстрирует хорошую точность расчетов во всем диапазоне производительностей циклона, для которого были получены экспериментальные данные. Средняя относительная ошибка вычислений — 2–3 %, максимальная — не более 5 %.

Результаты расчета течения воздуха в циклоне с бункером и экспериментальные данные приведены на **рис. 4–6**. Шаг по времени оценивали в соответствии с (3) и, например, для объемного расхода воздуха 80 м³/ч приняли равным 0,0006 с. Число итераций для выхода на квазистационарный режим менялось от 2000 до 3000 в зависимости от производительности.

Типичный вид поля скорости внутри циклона показан на **рис. 4**. Результаты соответствуют следующему расчетному случаю: производительность циклона 80 м³/ч; температура газа 20 °С; физическое

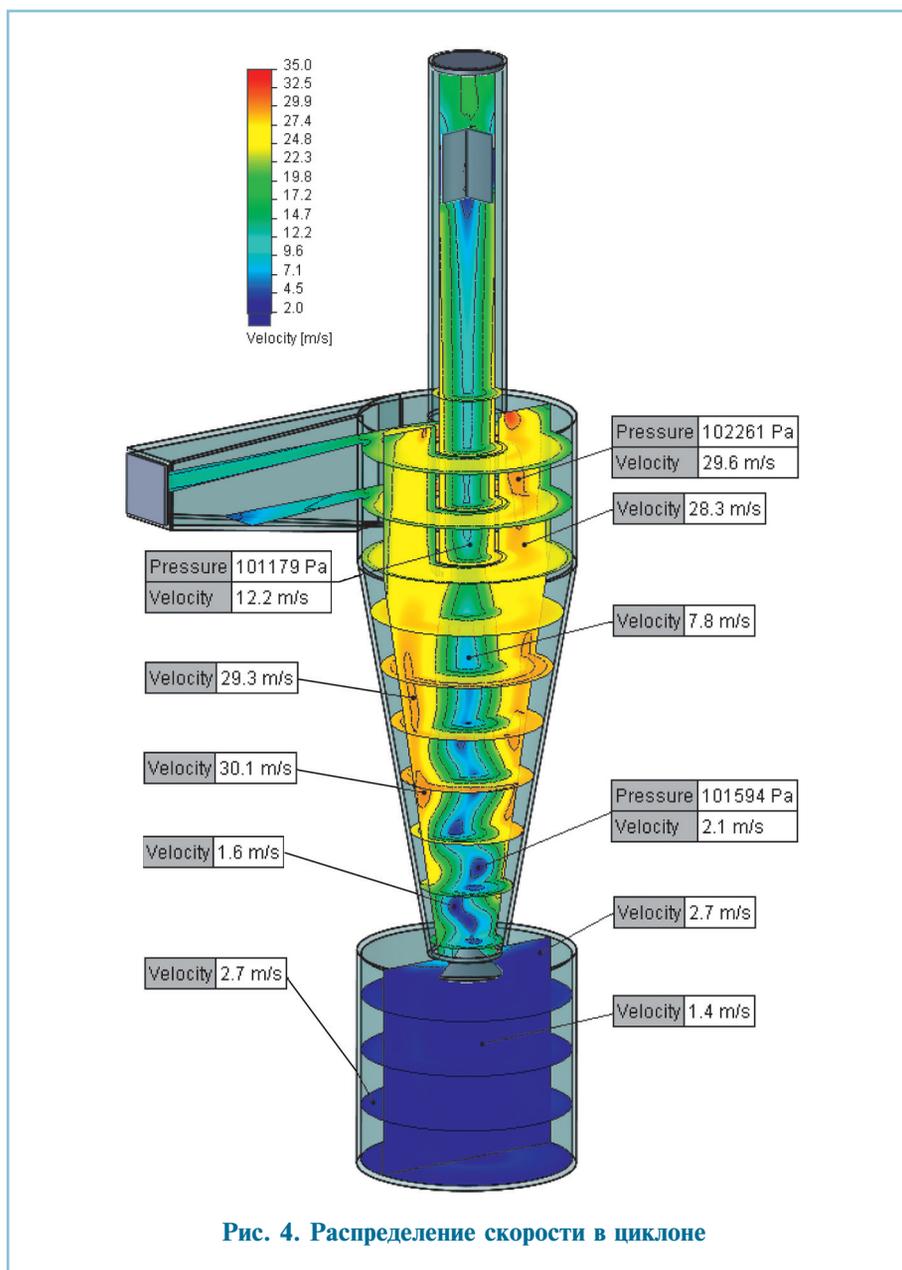


Рис. 4. Распределение скорости в циклоне

время процесса 3 с. Отметим сложную пространственную структуру течения внутри циклона.

На **рис. 5** приведено сравнение расчетных перепадов давлений с экспериментальными данными, полученными при различных температурах газа на входе в циклон с бункером [4]. Практически во всем диапазоне объемных расходов наблюдается хорошее соответствие результатов расчета и эксперимента. Относительная ошибка вычислений во всех рассматриваемых диапазонах объемных расходов и температур не превышала 5–10 %, и только для высокотемпературных

потоков ($t > 600$ °С) уровень максимальной ошибки был несколько выше 10 %.

Следует отметить, что большинство циклонов проектируют для очистки газовых потоков, температура которых редко превышает 400 °С. Поэтому температуры выше 400 °С могут рассматриваться как экстремальные, но даже при таких условиях рассмотренная математическая модель и алгоритмы ее численной реализации во FloEFD показали вполне удовлетворительный результат, причем в рамках единого подхода, без специальных коррекций на температуры газа на входе в циклон.

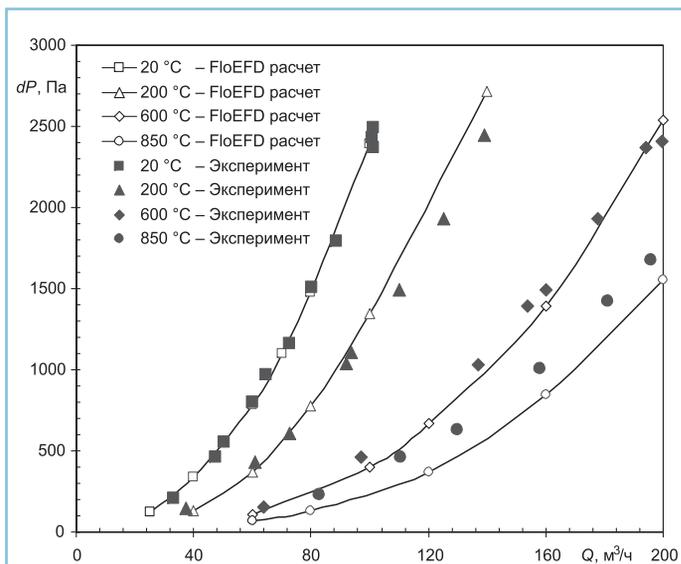


Рис. 5. Зависимость гидравлических сопротивлений dP циклона с бункером от производительности Q при различных температурах газа

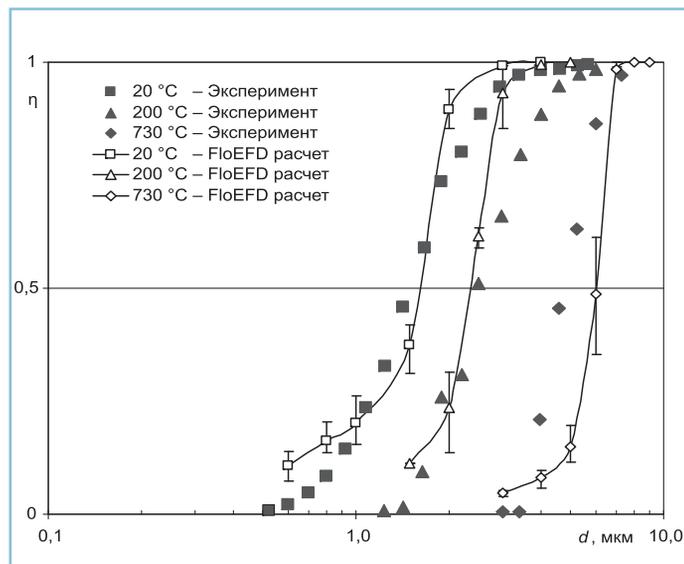


Рис. 6. Зависимость степени очистки газа η от размера частиц при различных температурах газа при производительности циклона $60 \text{ м}^3/\text{ч}$

На рис. 6 показаны расчетные степени очистки газа при различных температурах газа. Поскольку картина течения в циклоне нестационарная, то вероятность осаждения частицы для каждого диаметра рассчитывалась путем усреднения результатов по пяти запускам частиц. Каждый запуск частиц проводился по замороженному полю течения воздуха в циклоне, полученному в разные моменты времени. Вертикальные бары в каждой расчетной точке соответствуют максимальной и минимальной вероятности осаждения частицы определенного диаметра, полученной в серии из пяти запусков частиц.

Наблюдается удовлетворительная средняя точность расчета степеней очистки газа в сравнении с экспериментальными данными [4]. Отметим, что расчетная величина d_{50} (диаметр частиц, осажденных при фактических условиях работы циклона с эффективностью 50 %) точно воспроизводит экспериментальные значения, особенно при температурах газа менее $200 \text{ }^\circ\text{C}$. При более высоких температурах точность расчета незначительно снижается. Расчетные кривые эф-

фективности циклона имеют несколько более высокий градиент по сравнению с экспериментальными (см. рис. 6).

Выводы

1. Предложенные математическая модель и ее численная реализация с применением современных программных средств численного моделирования (например FloEFD) позволяют адекватно рассчитывать гидравлическое сопротивление и эффективность работы воздушных циклонов при различных температурах подаваемого воздуха в широком диапазоне газовых нагрузок.

2. Предложенная методика решения может быть полезной для инженерных расчетов интегральных аэродинамических характеристик технических устройств с сильно закрученными потоками рабочих сред, в том числе в рамках модифицированной $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

3. Использование вычислительного комплекса FloEFD при решении данного типа задач требует весьма умеренных вычислительных затрат, что вместе с полной интеграцией пакета во все

ведущие CAD системы позволяет существенно сократить продолжительность цикла проектирования и оптимизации оборудования.

Список литературы

1. Enhanced Turbulence Modeling in FloEFD™. MGC 02-11, TECH9670-w, Mentor Graphics Corporation, 2011.
2. Henderson C.B. Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows // AIAA Journal. 1976. Vol. 14. № 6.
3. Griffiths W.D., Boysan F. Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical Modelling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers // J. Aerosol Sci, 1996. Vol. 27. № 2. P. 281–304.
4. T. Lorenz. Heisgasentstauung mit Zyklonen, VDI-Fortschrittberichte, Reihe 3, Verfahrenstechnik № 366, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1994.
5. Boysan F. Ayer W.H., Swithenbank J.A. Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design // Trans. Inst. Chem. Eng. 1982, Vol. 60. № 4. P. 222–230.
6. Montavon C.A., Grotjans H., Hamill I.S. et al. Mathematical Modeling and Experimental Validation of Flow in a Cyclone // BHR International Conference on Cyclone Technologies № 5, Warwick. 31 May – 02 June, 2000. P. 175–185.

