

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛОНОВ ЦН-15 И СК-ЦН-34 С ПОМОЩЬЮ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Шишкин А.С., Бараковских Д.С., Шишкин С.Ф.

Шишкин Алексей Сергеевич, Бараковских Дмитрий Сергеевич, Шишкин Сергей Федорович  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Россия. 620062. г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.  
E-mail: a.s.shishkin@urfu.ru, d.s.barakovskikh@urfu.ru, shsf@planet-a.ru

*Циклоны широко применяются для отделения твердых дисперсных частиц от газа. При расчете циклона для конкретной задачи обычно ставятся цели выбора аппарата с минимальным сопротивлением и максимальным КПД улавливания. С помощью программ SolidWorks Flow Simulation и CADFlow проведены расчетные исследования аэродинамического сопротивления и КПД фракционного улавливания промышленных циклонов ЦН-15 и СК-ЦН-34 диаметром 500 и 1000 мм. Установлено, что для определения коэффициента сопротивления необходимо использовать адаптивную расчетную сетку с числом ячеек не менее 2 млн. Для расчета фракционного КПД улавливания циклонов необходимо подбирать коэффициенты восстановления для взаимодействия частиц со стенками аппарата. Результаты, полученные с помощью CFD-моделирования циклонов, показали хорошую адекватность расчетов коэффициентов аэродинамического сопротивления и удовлетворительное согласие степени фракционного улавливания с методикой НИИОГАЗ. Использование программ Flow Simulation и CADFlow также позволяет провести расчетную оптимизацию соотношений конструктивных размеров циклонов.*

**Ключевые слова:** процесс аспирации, циклон, коэффициент сопротивления, условная скорость потока, дисперсные частицы, фракционный КПД улавливания, коэффициент восстановления

## INVESTIGATION OF CN-15 AND SK-CN-34 CYCLONES USING CFD MODELING

Shishkin A.S., Barakovskikh D.S., Shishkin S.F.

Shishkin Alexey Sergeyevich, Barakovskikh Dmitry Sergeyevich, Shishkin Sergey Fedorovich  
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Russia. 620062. Yekaterinburg, 28 Mira Street.  
E-mail: a.s.shishkin@urfu.ru, d.s.barakovskikh@urfu.ru, shsf@planet-a.ru

*Cyclones are widely used for separating solid dispersed particles from gas. When designing a cyclone for a specific task, the primary objectives are typically to select a unit with minimal pressure drop and maximum collection efficiency. Computational studies of the aerodynamic resistance and fractional collection efficiency of industrial cyclones CN-15 and SK-CN-34 with diameters of 500 mm and 1000 mm were conducted using SolidWorks Flow Simulation and CADFlow software. It was established that an adaptive computational mesh with a minimum of 2 million cells is required to accurately determine the resistance coefficient. For calculating the fractional collection efficiency, it is necessary to calibrate the restitution coefficients governing particle-wall interactions. The results obtained from the CFD modeling of the cyclones showed a high adequacy in predicting the aerodynamic resistance coefficients and satisfactory agreement of the fractional efficiency values with the NIIOGAZ methodology. The use of Flow Simulation and CADFlow software also enables the computational optimization of the cyclones' structural dimension ratios.*

**Keywords:** aspiration process, cyclone, pressure drop coefficient, characteristic velocity, dispersed particles, fractional collection efficiency, restitution coefficient

### Для цитирования:

Шишкин А.С., Бараковских Д.С., Шишкин С.Ф. Исследование циклонов ЦН-15 и СК-ЦН-34 с помощью CFD-моделирования. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение.* 2025. № 4. С. 157-165. DOI: 10.6060/snt.20258404.00021.

## For citation:

Shishkin A.S., Barakovskikh D.S., Shishkin S.F. Study of cyclones CN-15 and SK-CN-34 using CFD modeling. *Modern high technology. Regional application*. 2025. N 4. P. 157-165. DOI: DOI: 10.6060/snt.20258404.00021.

## АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Циклоны широко применяются для отделения дисперсных частиц от газа в процессах аспирации мельниц, пневмокласификаторов, печей, сушил и других установок. Расчет и подбор циклонов обычно проводят по инженерным методикам, например, НИИОГАЗ, Лайта-Лихта и др. [1, 2]. При расчете циклона для конкретной задачи обычно ставятся цели выбора аппарата с минимальным сопротивлением и максимальным КПД улавливания. В последнее время с появлением многоядерных процессоров и CAD-программ таких, как *SolidWorks Flow Simulation*, *CADFlow*, *ANSYS CFX*, *FlowVision*, *KompasFlow*, и др. у конструкторов и разработчиков появилась возможность использовать для расчета методы вычислительной гидродинамики (*CFD* – *Computational Fluid Dynamics*). Большое количество работ появилось у нас в стране и за рубежом по расчетам циклонов с использованием *CFD*-методов [3–6]. В отличие от традиционных инженерных методик эти методы позволяют рассчитать поля скоростей, давлений, траектории потока газа и частиц, и другие параметры двухфазного потока, а также выявить влияние соотношения конструктивных размеров аппарата на его сопротивление и КПД улавливания. Особенно много работ выполнено по исследованию циклона Стейрмандта. В качестве примера можно привести работы Д. И. Мисюля [7].

В отечественной промышленности широко используются циклоны различных типов, нормализованных разработаны НИИОГАЗ [1], а размеры циклонов выражены в долях от диаметра. Эти циклоны выпускаются многими предприятиями и широко применяются в промышленности. Наибольшее распространение в промышленности получили циклоны типа ЦН-15. Это высокопроизводительные циклоны, которые применяются, как правило, для первой ступени газоочистки. Циклоны СК-ЦН-34 обладают высокой эффективностью и применяются для улавливания тонкодисперсных частиц. По обоим видам циклонов имеются достоверные экспериментальные данные по аэродинамическим сопротивлениям, которые приводятся в многочисленных справочниках [1–4]. Однако работы по исследованию данных циклонов с использованием *CFD*-программ практически отсутствуют. В качестве исключения можно привести работу [8] по

циклону СК-ЦН-34. Поэтому для оценки адекватности расчетов циклонов с помощью *CFD*-программ в настоящей работе были выбраны циклоны двух типов ЦН-15 и СК-ЦН-34.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является проверка адекватности определения аэродинамического сопротивления и степени фракционного улавливания циклонов типа ЦН-15 и СК-ЦН-34 с помощью программ *Flow Simulation* и *CADFlow*.

Расчет аэродинамического сопротивления циклонов, работающих в сети по традиционным инженерным методикам [1, 3, 4] предлагается определять по зависимости:

$$\Delta P_c = P_{вх} - P_{вых} = \zeta_c \rho \frac{w^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_c$  – разница полных давлений на входе  $P_{вх}$  и выходе  $P_{вых}$  из циклона, Па;  $\zeta_c$  – коэффициент сопротивления циклона, работающего в сети;  $\rho$  – плотность газа при рабочих условиях на входе в циклон, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – условная скорость в циклоне, м/с, она определяется как средняя скорость по поперечному сечению циклона:

$$w = \frac{4Q}{\pi D^2}, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр циклона, м.

Экспериментально, измерив разницу полных давлений на входе и выходе из циклона, коэффициент сопротивления циклона можно определить по зависимости:

$$\zeta_c = \frac{2\Delta P_c}{\rho w^2}. \quad (3)$$

Если истечение из циклона происходит с выходом в большой объем (например, циклон работает на выхлоп в атмосферу), то коэффициент полного сопротивления циклона больше, и вычисляется по зависимости:

$$\zeta_{\Pi} = \frac{2\Delta P_{\Pi}}{\rho w^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta P_{\Pi}$  – полные потери давления с учетом потерь на выходе,  $\Delta P_{\Pi} = P_{вх} - P_a$ , Па.

В справочниках [4] приводятся значения коэффициентов сопротивления для рассматриваемых циклонов. Для ЦН-15  $\zeta_c=155$ ;  $\zeta_{\Pi}=163$ . Для СК-ЦН-34  $\zeta_c=1050$ ;  $\zeta_{\Pi}=1150$ . Эти значения получены в результате многочисленных экспериментальных данных, поэтому примем их для оценки адекватности коэффициентов сопротивления рассчитанных с помощью *CFD*-программ.

Фракционный КПД улавливания циклонов можно рассчитывать по двум инженерным методикам: НИИОГАЗ [1, 3] и Лайта-Лихта [9].

По методике НИИОГАЗ функция фракционного улавливания описывается нормально-логарифмическим законом и имеет вид:

$$\eta(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_i} e^{-\frac{x_i^2}{2}} dx_i, \quad (5)$$

где параметр  $x_i$  определяется зависимостью:

$$x_i = \frac{\lg(d_i/d_{50})}{\lg\sigma_\eta}, \quad (6)$$

где  $d_i$  – текущий размер частиц;  $d_{50}$  – диаметр частиц, улавливаемых со степенью 0,5 (на 50%);  $\lg\sigma_\eta$  – стандартное отклонение в функции распределения. Для циклонов ЦН-15  $\lg\sigma_\eta = 0,352$ , а для циклона СК-ЦН-34  $\lg\sigma_\eta = 0,308$ .

Медианный размер частиц  $d_{50}$ , улавливаемых на 50% определяется по зависимости:

$$d_{50} = d_{m50} \sqrt{\frac{D}{D_m} \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_m} \frac{\mu}{\mu_m} \frac{w_0}{w}}, \quad (7)$$

где модельные параметры:  $D_m = 0,6$  м;  $\rho_m = 1930$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_m = 22 \cdot 10^{-5}$  Па·с;  $w_0 = 3,5$  м/с (для ЦН-15) и  $w_0 = 1,7$  м/с (для СК-ЦН-34);  $d_{m50} = 4,5$  мкм (для ЦН-15) и  $d_{m50} = 1,95$  мкм (для СК-ЦН-34), а  $D$ ,  $\rho_{\text{ч}}$ ,  $\mu$ ,  $w$  – фактические параметры, соответственно диаметр циклона, плотность частиц, вязкость газа, средняя условная скорость.

Таким образом, функция фракционного улавливания имеет два параметра:  $d_{50}$  и  $\lg\sigma_m$ . Причем если медианный размер частиц  $d_{50}$  вычисляется,

то параметр  $\lg\sigma_m$  постоянная величина для данного типа циклонов.

По методике Лайта-Лихта функция фракционного улавливания зависит от соотношения размеров и описывается более сложной функцией:

$$\eta(d_i) = 1 - \exp, \quad (8)$$

где параметры  $C$ ,  $n$  зависят от геометрического соотношения размеров циклона, а величина  $\psi_i(d_i)$  характеризует процесс осаждения и определяется выражением:

$$\psi_i(d_i) = \frac{d_i^2 \rho_{\text{ч}} v_{\text{вх}}}{18\mu D} (n + 1), \quad (9)$$

где  $d_i$  – диаметр частицы, м;  $v_{\text{вх}}$  – скорость газового потока во входном патрубке.

Методика Лайта-Лихта с примерами подробно изложена, например, в [9].

Если известен гранулометрический состав улавливаемого продукта в виде частных остатков  $r(d_i)$ , то суммарный массовый КПД улавливания можно вычислить по зависимости:

$$\text{КПД} = \frac{\eta(d_i)r(d_i)}{100}, \quad (10)$$

Степень фракционного улавливания для цилиндрических циклонов по методикам НИИОГАЗ и Лайта-Лихта удовлетворительно согласуются между собой. Для конических циклонов методика Лайта-Лихта дает худший результат, так как она разрабатывалась на базе опытных данных для цилиндрических циклонов. Это можно показать на примере расчетов циклонов ЦН-15-1000 и СК-ЦН-34-1000 (рис. 1.).

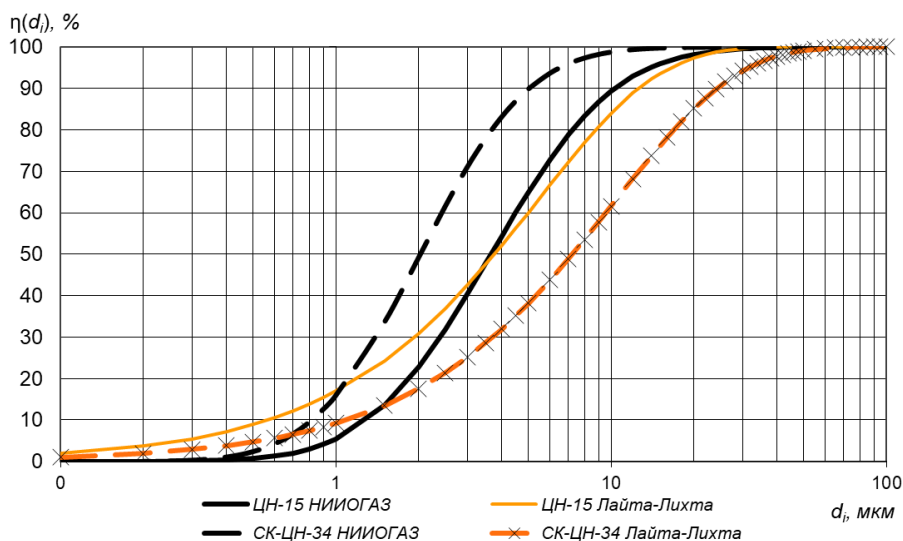


Рис. 1. Сравнительные данные расчета фракционного КПД улавливания циклонов ЦН-15-1000 и СК-ЦН-34-1000 по методикам НИИОГАЗ и Лайта-Лихта

Fig. 1. Comparative data on the fractional collection efficiency calculation for cyclones CN-15-1000 and SK-CN-34-1000 using the NIOGAZ and Licht-Leithner methodologies

Так для циклона ЦН-15-1000 по методикам НИИОГАЗ и Лайта-Лихта медианные размеры составляют соответственно  $d_{50} = 3,66$  мкм и  $d_{50} = 3,77$  мкм, а для конических циклонов СК-ЦН-33-1000 медианные размеры существенно отличаются  $d_{50} = 2,03$  мкм и  $d_{50} = 7,23$  мкм соответственно.

Поэтому в качестве критерия для сравнения и оценки расчетов эффективности улавливания в CFD-программе выбрана методика НИИОГАЗ.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

##### Расчет коэффициентов сопротивления циклонов

Расчет с использованием программ *Solid Works Flow Simulation* и *CADFlow* позволяет вычислить поле давлений и поле скоростей потока в циклоне. После задания геометрии циклона и расчетной области, свойств среды и выбора модели турбулентности, задаются граничные условия (ГУ) – массовый расход воздуха  $G_b$  на входе, и давление

$P_a$  на выходе из циклона. После запуска решения на начальной сетке программа подбирает полное давление на входе, чтобы обеспечить ГУ. В результате решения определяются целевые параметры: полное давление, скорости потока, плотность, температура воздуха во входном и выходном сечениях, а также поля скоростей и давлений во всем расчетном объеме циклона. По зависимостям (3) и (4) программа вычисляет на каждой итерации коэффициенты сопротивления циклона  $\zeta_c$  и  $\zeta_n$ . Режим движения газов в циклонах характеризуется высокими значениями критерия Рейнольдса и высокой интенсивностью турбулентности. В расчете использовались различные модели турбулентности. Для адекватного определения гидравлического сопротивления циклона подходит *I-L* модель турбулентности. В качестве примера на рис. 2. представлены результаты расчета циклона ЦН-15-1000 для массового расхода воздуха  $G_b = 3,0$  кг/с.

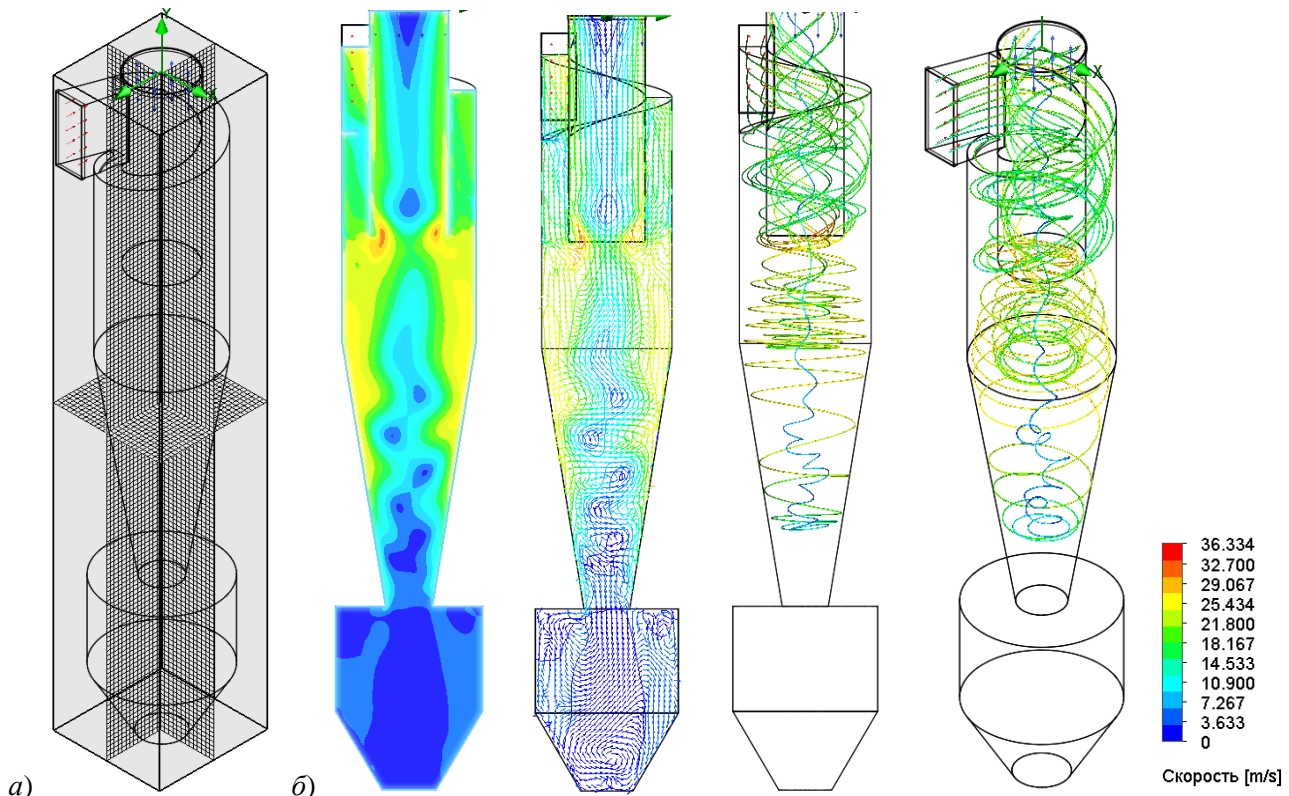


Рис. 2. Расчет циклона ЦН-15-1000 для массового расхода воздуха  $G_b = 3,0$  кг/с

а) расчетная область и начальная сетка 807560 ячеек; б) поле скоростей потока в вертикальном сечении и изометрии

Fig. 2. Calculation of the CN-15-1000 cyclone for an air mass flow rate of  $G_b = 3.0$  kg/s

а) computational domain and initial mesh of 807,560 cells; б) flow velocity field in a vertical section and in an isometric view

Как показали многочисленные расчеты важно в опциях расчета включать только турбулентный режим, а сетка должна быть адаптивной и содержать не менее 2-х или 4-х млн. ячеек. Так, например, после 386 итераций на начальной сетке

коэффициент сопротивления циклона стабилизируется на значении  $\zeta_c \approx 107$ . Дальнейшее увеличение числа итераций не приводит к его увеличению. После включения адаптации расчетной сетки и

увеличения числа ячеек, например, до 4 млн. значение коэффициента сопротивления стабилизируется и достигает значения  $\zeta_c \approx 153$ , что хорошо согласуется с общепринятыми опытными данными  $\zeta_c \approx 155$ , приведенными в [4]. В табл. 1 и на рис. 3. приведены расчетные данные коэффициента сопротивления циклона ЦН-15-1000 для различных массовых расходов воздуха.

Таблица 1

Расчетное значение коэффициента сопротивления циклона ЦН-15-1000 в зависимости от массового расхода воздуха  
Table 1. The calculated value of the pressure drop coefficient for the CN-15-1000 cyclone as a function of the air mass flow rate

$G_b$ , кг/с	$w$ , м/с	$\Delta P_c$ , Па	$\zeta_c$
1,3	1,38	180,4	158,1
2,3	2,43	545,1	153,6
3,0	3,16	914,0	151,3
3,3	3,47	1107,0	152,2
4,0	4,19	1607,8	151,1
среднее значение $\zeta_c$			153,3
справочные данные [4] $\zeta_c$			155,0

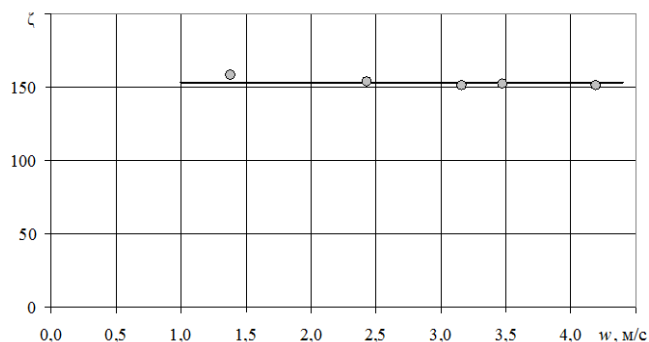


Рис. 3. Расчетное значение коэффициента сопротивления от условной скорости в циклоне ЦН-15-1000

Fig. 3. The calculated value of the pressure drop coefficient versus the characteristic velocity in the CN-15-1000 cyclone

Аналогично, с использованием программы *SolidWorks Flow Simulation*, были проведены расчеты циклонов СК-ЦН-34-500 и СК-ЦН-34-1000. Результаты вычисления коэффициентов сопротивления при различных массовых расходах воздуха представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2

Расчетное значение коэффициентов сопротивления циклонов СК-ЦН-34-500 и СК-ЦН-34-1000 в зависимости от массового расхода воздуха  
Table 2. The calculated values of the pressure drop coefficients for the SK-CN-34-500 and SK-CN-34-1000 cyclones as a function of the air mass flow rate

СК-ЦН-34-500				СК-ЦН-34-1000			
$G_b$ , кг/с	$w$ , м/с	$\Delta P_n$ , Па	$\zeta_n$	$G_b$ , кг/с	$w$ , м/с	$\Delta P_n$ , Па	$\zeta_n$
0,242	1,02	559	1137	1,000	1,06	741	1105
0,300	1,26	841	1117	1,500	1,57	1646	1099
0,360	1,51	1244	1143	2,000	2,07	2819	1079
0,400	1,67	1473	1111	2,500	2,55	4379	1105
0,450	1,87	1914	1144	2,750	2,92	5692	1105
0,500	2,07	2321	1130	3,000	3,03	6181	1074
среднее значение $\zeta_n$			1130	среднее значение $\zeta_n$			1095
справочные данные [4] $\zeta_n$			1150	справочные данные [4] $\zeta_n$			1150

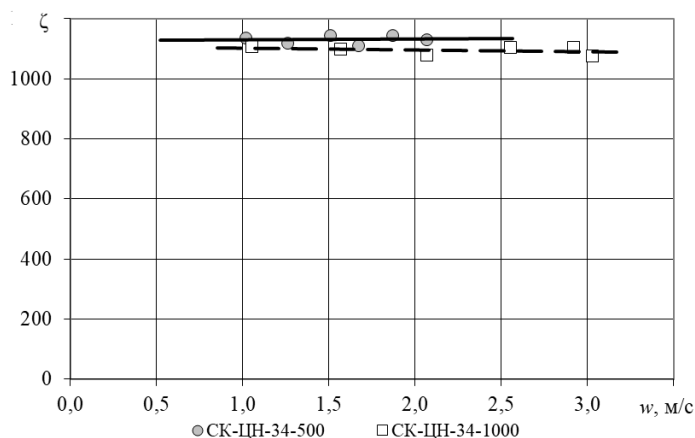


Рис. 4. Расчетное значение коэффициентов сопротивления от условной скорости в циклонах СК-ЦН-34-500 и СК-ЦН-34-1000  
Fig. 4. The calculated values of the pressure drop coefficients versus the characteristic velocity for the SK-CN-34-500 and SK-CN-34-1000 cyclones

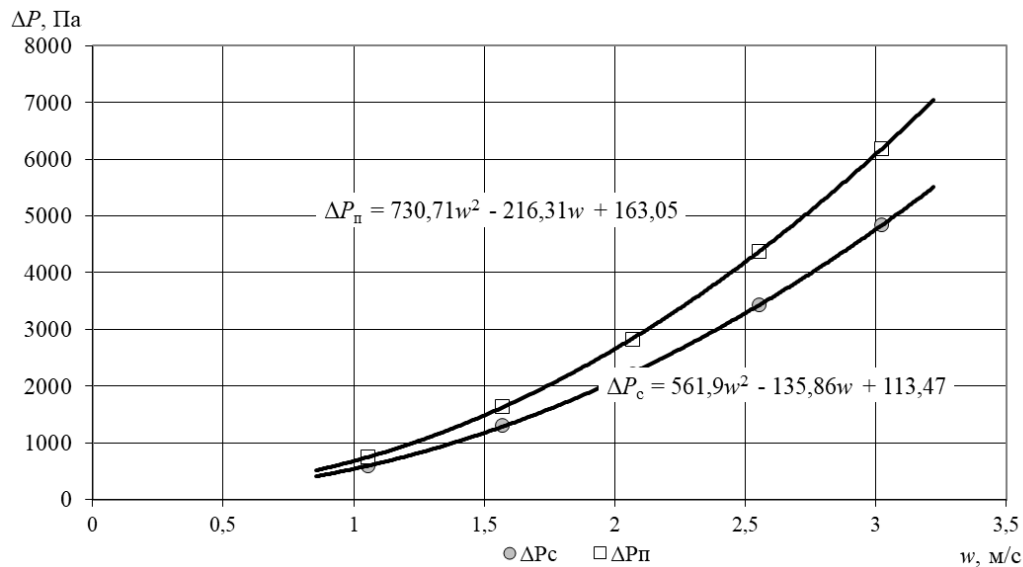


Рис. 5. Зависимости сопротивления циклона СК-ЦН-34-1000, работающего в сети  $\Delta P_c$  и на выхлоп  $\Delta P_n$   
Fig. 5. Dependence of the aerodynamic resistance of the SK-CN-34-1000 cyclone operating in a system  $\Delta P_c$  and on exhaust  $\Delta P_n$

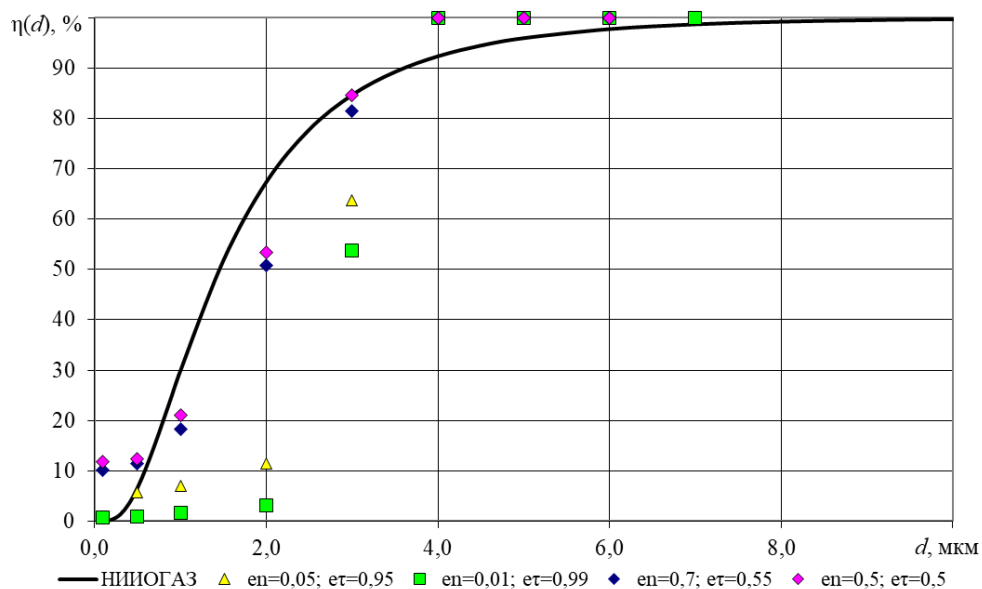


Рис. 6. Степень фракционного улавливания частиц кварцевого песка  
Fig. 6. Fractional collection efficiency for quartz sand particles

На рис. 5 представлены расчетные графики зависимостей сопротивления циклона СК-ЦН-34-1000, работающего в сети  $\Delta P_c$  и на выхлоп  $\Delta P_n$ . Полученные зависимости подтверждают квадратичный характер зависимости сопротивления циклона от скорости и постоянство коэффициента сопротивления.

*Расчет фракционной степени улавливания циклонов*

Программы *SolidWorks Flow Simulation* и *CADFlow* позволяют вычислять траекторию частиц и, используя встроенную статистику, определить число частиц, покинувших циклон. Это позволяет

вычислить степень фракционного улавливания частиц заданного размера и плотности. Однако есть определенные ограничения. Так не учитывается взаимодействие частиц и столкновения друг с другом, поэтому концентрация материала должна быть ограничена. Есть неопределенность учета взаимодействия частиц со стенками аппарата. Необходимо правильно задавать коэффициенты восстановления скорости по нормали  $e_n$  и по касательной  $e_t$ . Проведенные настроечные расчеты показали, что число частиц, которые запускаются на входе в циклон, должно быть не менее 400. Если, например, число частиц равно 100, то при дальнейшем увеличении



числа частиц, статистические данные будут изменяться. Если число частиц больше 400, то увеличение числа частиц практически не влияет на результат. Главной проблемой расчета фракционной степени улавливания является задание корректных коэффициентов восстановления скорости  $e_n$  и  $e_\tau$  при взаимодействии частиц со стенками циклона. Это иллюстрирует график зависимости степени улавливания частиц на рис. 6. Как следует из представленных данных, значение коэффициентов восстановления существенно влияет на степень улавливания частиц. Наиболее близкий результат к методике НИИОГАЗ дают значения  $e_n=0,5$  и  $e_\tau=0,5$ , а также данные из работы [10]  $e_n=0,7$  и  $e_\tau=0,55$ . Программы *Flow Simulation* и *CADFlow* являются внешними приложениями, которые устанавливаются в программу *SolidWorks*. Причем отечественная программа *CADFlow* может устанавливаться также и в программу *KOMPAS-3D*. Отметим, что проведенные выборочные расчеты в обеих программах для одинаковых исходных данных дали идентичный результат.

Кроме этого, можно отметить отличия от методики НИИОГАЗ в области тонких частиц, менее 1,0 мкм, и высокую степень улавливания для частиц более 4,0 мкм. Улавливание очень тонких частиц связано с так называемым «fish-hook эффектом» [11], когда тонкие частицы, за счет большой удельной поверхности, образуют более крупные агрегаты и налипают на крупные частицы. Поэтому кривые фракционного улавливания напоминают рыболовный крючок, а явление получило название «fish-hook эффект». Данный эффект оказывает существенное влияние на степень улавливания тонких частиц, однако он не учитывается в стандартных инженерных методиках. Поэтому предложены специальные методы его учета [12-14].

Также необходимо отметить, что расчеты траекторий частиц в *CFD*-программе показывают достаточно большое число частиц, которые накапливаются в циклоне. Эти частицы присутствуют в нем длительное время. Особенно это проявляется в крупных промышленных циклонах. Испытания промышленных циклонов показывают, что после прекращения подачи материала и выхода материала из бункера циклона в нем все еще находится большое количество материала. Центробежная сила на несколько порядков превышает силу тяжести, действующую на отдельную частицу. Это является причиной накопления пристенного слоя. Только после отключения воздушного потока, накопленный в циклоне материал начинает разгружаться. Таким образом, механизм осаждения частиц в бункер сложный и нуждается в отдельном рассмотрении процесса.

На данном этапе для определения степени фракционного улавливания с использованием *CFD*-программ можно рекомендовать подбор коэффициентов восстановления таким образом, чтобы медианный размер частиц приближался к медианному размеру по зависимости (7), рекомендованной НИИОГАЗ и справочниками.

Используя такой подход, были рассчитаны степени фракционного улавливания циклонов ЦН-15-1000, СК-ЦН-34-500 и СК-ЦН-34-1000. Результаты расчетов в сравнении с методикой НИИОГАЗ представлены на рис. 7, 8, 9. На рис. 7 приведен расчет степени фракционного улавливания частиц кварца по методикам НИИОГАЗ, *Flow Simulation* при  $e_n = 0,05$  и  $e_\tau = 0,95$  и аппроксимации расчетных значений функцией Розина–Рамлера. Расчет выполнен для массового расхода воздуха  $G_v = 2,99$  кг/с и температуре воздуха  $t = 20$  °С.

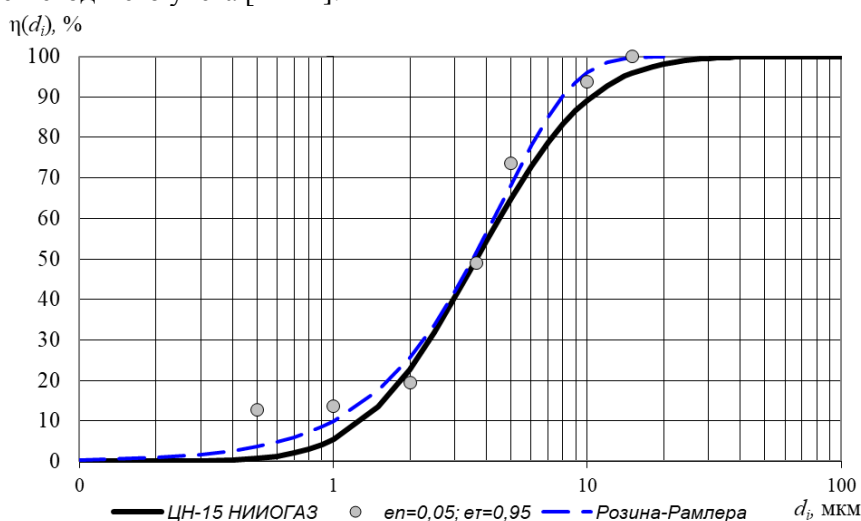


Рис. 7. Расчет степени фракционного улавливания циклонов ЦН-15-1000  
Fig. 7. Calculation of the fractional collection efficiency for the CN-15-1000 cyclone

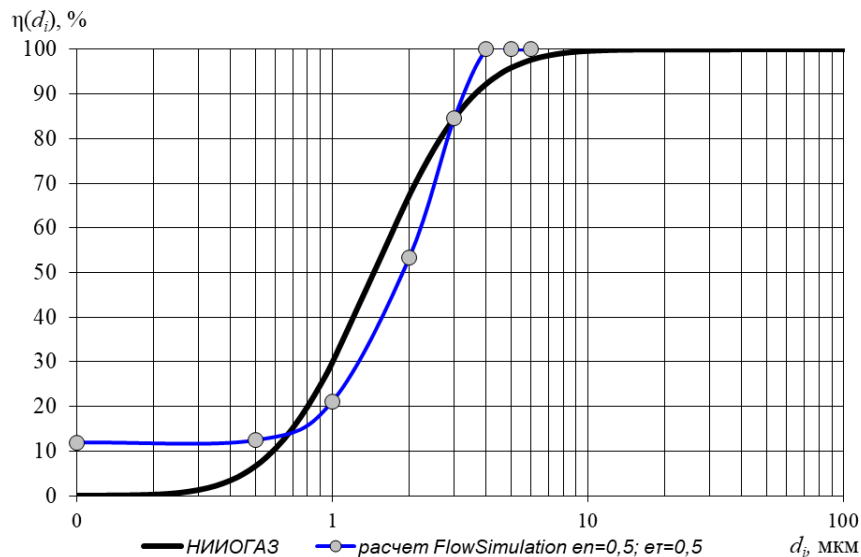


Рис. 8. Расчет степени фракционного улавливания циклонов СК-ЦН-34-500  
Fig. 8. Calculation of the fractional collection efficiency for the SK-CN-34-500 cyclone

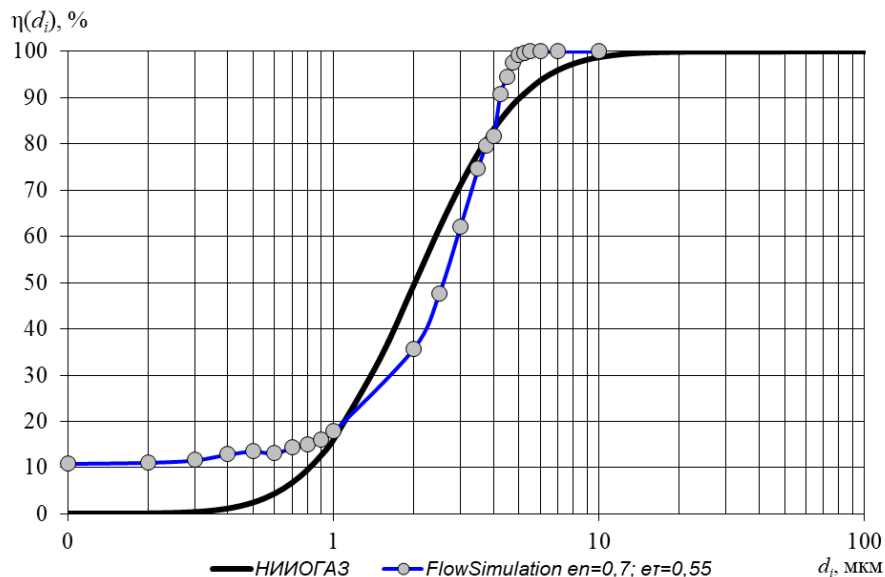


Рис. 9. Расчет степени фракционного улавливания циклонов СК-ЦН-34-1000  
Fig. 9. Calculation of the fractional collection efficiency for the SK-CN-34-1000 cyclone

Расчет циклона СК-ЦН-34-500 выполнен при  $e_n = 0,5$  и  $e_t = 0,5$  для массового расхода воздуха  $G_b = 0,36$  кг/с и температуре воздуха  $t = 20$  °С.

Расчет циклона СК-ЦН-34-1000 выполнен при  $e_n = 0,7$  и  $e_t = 0,55$  для массового расхода воздуха  $G_b = 1,48$  кг/с и температуре воздуха  $t = 20$  °С.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты циклонов ЦН-15 и СК-ЦН-34 в программах *Flow Simulation* и *CADFlow* показали хорошую адекватность расчетов коэффициентов аэродинамического сопротивления. Расчет степени фракционного улавливания с приме-

нием *CFD*-программ показывает удовлетворительное согласие с методикой НИИОГАЗ. Однако обе методики нуждаются в дополнительных экспериментальных и расчетных исследованиях. Методика расчета фракционного улавливания НИИОГАЗ на базе аппроксимации нормально-логарифмического закона не учитывает особенности улавливания тонких частиц  $d < 1,0$  мкм. В области тонких частиц расчет по *CFD*-программам дает более достоверный результат, но завышает степень улавливания крупных частиц размером более медианного  $d > d_{50}$  мкм.

Таким образом, использование программ *Flow Simulation* и *CADFlow* позволяет не только



рассчитать аэродинамическое сопротивление аппаратов и оценить КПД улавливания циклонов, но и провести расчетную оптимизацию соотношений конструктивных размеров циклонов.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## ЛИТЕРАТУРА

## REFERENCES

1. Биргер М.И., Вальберг А.Ю., Мягков Б.И. [и др.]. Справочник по пыли- и золоулавливанию; под общей редакцией Русанова А.А.; 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат. 1983. 312 с.
2. Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г., Швыдкий Д.В. Теоретические основы очистки газов: Учебник для вузов. Москва: Машиностроение-1. 2001. 502 с.
3. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации; под науч. ред. Ужова В.Н. Ярославль: Верх.-Волж. книж. изд-во. 1970. 95 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям; под ред. Штейнберга М.О.; 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение. 1992. 627 с. ISBN 5-217-00393-6.
5. Raoufi A., Shams M., Kanani H. CFD analysis of flow field in square cyclones. *Powder Technology*. 2009. V. 191. N 3. P. 349–357. DOI:10.1016/j.powtec.2008.11.007.
6. Utikar R., Darmawan N., Tade M. [et al.]. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators. *Computational Fluid Dynamics*. 2010. DOI: 10.5772/7106.
7. Misiulia D., Liden G., Antonuk S. Cyclone dimensionless pressure drop, cut size, and separation slop: On dimensionless number (Reynolds) to rule them all. *Particuology*. 2024. V. 95. P. 235–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.10.001>.
8. Яковлева, Е.Е., Шарай Е.Ю. Анализ возможности использования длинноконического циклона типа СК-ЦН-34 для очистки выбросов котельных. Будущее машиностроения России: Сборник докладов Четырнадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. Москва, 21–24 сентября 2021. Т. 2. С. 92–99. EDN ATOTMO.
9. Шишкин А.С., Шишкин С.Ф. Примеры расчетов аэродинамических процессов переработки сыпучих материалов в Excel. Учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург: Информационный портал УрФУ. 2016. 409 с. Режим доступа: [https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13462/1/Shishkin\\_Shishkin.pdf](https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13462/1/Shishkin_Shishkin.pdf)
10. Ляшенко Я.А., Виллерт Э., Попов В.Л. Механика столкновений твердых тел: влияние трения и адгезии. I. Обзор экспериментальных и теоретических работ. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2018. № 2. С. 44–61. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.05.
11. Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф. Аномалия степени фракционного разделения в центробежных классификаторах. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2025. № 1. С. 62–68. DOI: 10.6060/snt.20258101.007.
12. F. Bourgeois, A.K. Majumder. Is the fish-hook effect in hydrocyclones a real phenomenon. *Powder Technology*. 2013. V. 237. P. 367–375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.017>.
13. Дик И.Г., Миньков Л.Л., Пикушак Е.В. Моделирование «Fish-hook» эффекта в классификационном аппарате. *Инженерно-физический журнал*. 2007. Т. 80. № 1. С. 60–69.
14. Betz M., Nirschl H., Gleiss M. Development of a New Solver to Model the Fish-Hook Effect a Centrifugal Classifier. *Minerals*. 2021. V. 11(7). N 663. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11070663>.
1. Birger M.I., Valberg A.Yu., Myagkov B.I. [et al.]. Handbook of dust and ash collection; edited by Rusanov A.A.; 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Energoatomizdat. 1983. 312 p.
2. Shvydkiy V.S., Ladygichev M.G., Shvydkiy D.V. Theoretical Foundations of Gas Purification: Textbook for Universities. Moscow: Mashinostroenie-1. 2001. 502 p.
3. NIIOGAZ Cyclones. Guidelines for Design, Manufacturing, Installation, and Operation; edited by V.N. Uzhov. Yaroslavl: Upper Volga Book Publishing House. 1970. 95 p.
4. Idelchik I.E. Handbook of Hydraulic Resistances; edited by Shteinberg M.O.; 3rd ed., revised and expanded. Moscow: Mashinostroenie. 1992. 627 p. (in Russian).
5. Raoufi A., Shams M., Kanani H. CFD analysis of flow field in square cyclones. *Powder Technology*. 2009. Vol. 191. N 3. P. 349–357. DOI:10.1016/j.powtec.2008.11.007.
6. Utikar R., Darmawan N., Tade M. [et al.]. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators. *Computational Fluid Dynamics*. 2010. DOI: 10.5772/7106.
7. Misiulia D., Liden G., Antonuk S. Cyclone dimensionless pressure drop, cut size, and separation slop: On dimensionless number (Reynolds) to rule them all. *Particuology*. 2024. V. 95. P. 235–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.10.001>.
8. Yakovleva, E.E., Sharai E.Yu. Analysis of the possibility of using a long-conical cyclone type SK-CN-34 for cleaning boiler plant emissions. Future of Mechanical Engineering in Russia: Collection of Reports of the Fourteenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists. Moscow, September 21-24, 2021. V. 2. P. 92–99. (in Russian). EDN ATOTMO.
9. Shishkin A.S., Shishkin S.F. Examples of Calculations for Aerodynamic Processes in Bulk Material Processing Using Excel: Electronic Educational Text Edition. Yekaterinburg: Ural Federal University Information Portal, 2016. 409 p. Available at: [https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13462/1/Shishkin\\_Shishkin.pdf](https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13462/1/Shishkin_Shishkin.pdf). (in Russian).
10. Lyashenko Ya.A., Willert E., Popov V.L. Mechanics of collisions of solid: influence of friction and adhesion. I. Review of experimental and theoretical works. *Bulletin of PNRPU. Mechanics*. 2018. N 2. P. 44–61. (in Russian).
11. Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S.F. Anomaly of the Fractional Separation Degree in Centrifugal Classifiers. *Modern high technologies. Regional application*. 2025. N 1. P. 62–68. (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20258101.007.
12. Bourgeois F., Majumder A.K. Is the fish-hook effect in hydrocyclones a real phenomenon. *Powder Technology*. 2013. V. 237. P. 367–375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.017>.
13. Dik I.G., Minkov L.L., Pikushchak E.V. Modeling of the “Fish-hook” effect in the classification apparatus. *Engineering Physics Journal*. 2007. Vol. 80. N 1. P. 60–69.
14. Betz M., Nirschl H., Gleiss M. Development of a New Solver to Model the Fish-Hook Effect a Centrifugal Classifier. *Minerals*. 2021. V. 11(7). N 663. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11070663>.

Поступила в редакцию(Received) 23.09.2025  
Принята к опубликованию (Accepted) 30.10.2025