

УДК 004.42+621.928.93

*ТОЛСТЫХ АЛЕКСАНДР ВИТАЛЬЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доцент,
sinvintie@rambler.ru*

*ДОРОШЕНКО ЮЛИЯ НИКОЛАЕВНА, канд. техн. наук, доцент,
kafotopvent1@rambler.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ОПЕРАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ В ЦИКЛОНАХ*

При проведении реконструкции систем вентиляции и пылеудаления в цехе по опудриванию зефира кондитерской фабрики «Красная звезда» (г. Томск) была разработана и апробирована компьютерная программа «Расчет циклонов». Эта программа позволяет оперативно рассчитать фракционные коэффициенты очистки, дисперсию, медианный размер улавливаемых частиц и потери давления в отдельных циклонах НИИОГАЗ и их каскадах, работающих в любом диапазоне исходных параметров. Возможность быстрого выполнения многовариантных расчетов обеспечивает выбор необходимых параметров при регулировании систем промышленной вентиляции, выбросы которых очищаются от пыли в циклонах.

Ключевые слова: эффективность пылеулавливания; циклоны; каскады; потери давления; фракционный проскок; расчет циклонов.

*ALEKSANDR V. TOLSTYKH, PhD, A/Professor,
sinvintie@rambler.ru*

*YULIYA N. DOROSHENKO, PhD, A/Professor,
kafotopvent1@rambler.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

OPERATION CONTROL SYSTEMS OF INDUSTRIAL VENTILATION FOR EFFECTIVE GAS PURIFICATION IN CYCLONES

The paper presents the 'Cyclone computations' software designed for the reconstruction of ventilation and dust removal system in the powdering marshmallow soufflé workshop of Tomsk factory 'Krasnaya zvezda'. This program allows a quick calculation of fractional decontamination factors, dispersion, median size of trapped particles and pressure loss in NIIOGAZ cyclones and their cascades operating in any range of initial parameters. The possibility is shown for the quick performance of multiple calculations to select the required parameters under the industrial ventilation system control, the dust removal of which occurs in cyclones.

Keywords: dust collection efficiency; cyclones; cascades; pressure loss; fractional slip; cyclone computations.

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Минобрнауки РФ (№ 02.G25.31.0022).

В различных современных технологических процессах возникает потребность в очистке вентиляционных выбросов от выделяющихся с газами тонкодисперсных пылей. Большинство современных производителей пылегазоочистного оборудования предлагают использовать в системах очистки воздуха для промышленных предприятий различные типы фильтров [1, 2]. Эти устройства имеют высокую стоимость по сравнению с инерционными пылеуловителями, и их эксплуатация невозможна без использования дополнительных устройств для регенерации фильтровального материала. В то же время инерционные пылеулавливающие аппараты даже при внешней простоте их конструкции продолжают соперничать с аппаратами других принципов пылегазоочистки [3, 4]. Несмотря на значительное количество экспериментальных и теоретических исследований, в настоящее время еще не сложился единый подход к расчету инерционных пылеуловителей. Рекомендации по компоновке инерционных пылеуловителей приведены в работе [5]. В исследовании [6] разработана математическая модель пылеулавливания в циклоне и создано на ее основе программное обеспечение для расчета и проектирования новых типов циклонов, авторами работы [7] предложена другая вычислительная технология расчета аэродинамики циклонной камеры. В работе [8] представлена автоматизированная система исследования циклонов и скрубберов, а также отмечено, что в настоящее время отсутствует программное обеспечение для прогнозирования работы пылеуловителей. Согласно [9], методики расчета циклонов НИИОГАЗ [10] можно считать полными, строгими и достаточно точными, естественно, для определенного типа циклонов и рабочих условий. Именно эти способы расчета, а также универсальный метод расчета инерционных пылеуловителей [9] были положены в основу алгоритма, реализованного в программе «Расчет циклонов», разработанной авторами статьи.

Необходимость разработки программы для расчета циклонов возникла при выполнении проекта реконструкции систем вентиляции и пылеудаления в цехе по опудриванию зефира кондитерской фабрики «Красная звезда» (г. Томск). В уже существующей системе пылеудаления цеха по опудриванию зефира были установлены 4 противоточных циклона, конструктивная схема которых полностью аналогична схеме циклонов НИИОГАЗ ЦН-15. С целью обеспечения регулирования и настройки систем вентиляции и пылегазоочистного оборудования разработана специальная компьютерная программа «Расчет циклонов», предназначенная для выполнения расчетов эффективности пылеулавливания и гидравлического сопротивления каскада циклонов при любых изменениях режимов работы технологического оборудования цеха, определяющих фракционный состав пыли сахарной пудры и влияющих на тепловлажностные параметры внутреннего воздуха.

Фракционный коэффициент очистки циклонных аппаратов η_8 , %, достаточно точно описывается выражением, выведенным путем математической обработки уравнения для вероятностных функций:

$$\eta_8 = 50(1 + \Phi(x)), \quad (1)$$

где функция $\Phi(x)$ в соответствии с указаниями [10] определяется следующей зависимостью:

$$\Phi(x) = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/\sqrt{2}} \exp(-t^2) dt. \quad (2)$$

Применительно к циклонам значение x наиболее удобно определять, пользуясь выражением, предложенным В.Ю. Падва:

$$x = \frac{\lg \left(\frac{\delta}{\delta_{50,ц} K \cdot 10^3 \sqrt{\frac{D\mu}{\rho_m W_{ц}}}} \right)}{\sigma_{ц}}, \quad (3)$$

где δ – диаметр частиц, мкм, улавливаемых в циклоне с эффективностью n_δ ; $\delta_{50,ц}$ – диаметр частиц, мкм, улавливаемых в условном циклоне с эффективностью 50 %, определяется из справочной таблицы [10]; $\sigma_{ц}$ – величина, характеризующая дисперсию частиц, улавливаемых циклоном; $W_{ц}$ – условная скорость в плане корпуса циклона, м/с; K – коэффициент, связанный с типом циклона [10]; ρ_m – плотность вещества пыли, кг/м³; D – внутренний диаметр циклона, м; μ – вязкость газа, н·с/м².

Условная скорость, м/с, определяется из отношения объемного расхода газов Q_p к полному поперечному сечению корпуса циклона:

$$W_{ц} = \frac{4Q_p}{\pi D^2 3600}. \quad (4)$$

Полная эффективность очистки газов в одиночном циклоне η_0 , %, рассчитывается по выражению

$$\eta_0 = 50(1 + \Phi(x')), \quad (5)$$

где

$$x' = \frac{\lg \left(\frac{\delta_{50}}{\delta_{50,ц} K \cdot 10^3 \sqrt{\frac{D\mu}{\rho_m W_{ц}}}} \right)}{\sqrt{\sigma_{ц}^2 + \lg^2 \sigma^2}}, \quad (6)$$

где δ_{50} – медиана распределения частиц пыли при входе в циклон, мкм; $\sigma = \delta_{50} / \delta_{16}$ – величина, характеризующая распределение частиц пыли по дисперсному составу; δ_{16} – диаметр частиц пыли на входе в циклон, при котором

суммарный вес всех частиц, имеющих размер, меньший, чем δ_{16} , составляет 16 % от общего веса пыли.

При групповой компоновке циклонов величина коэффициента очистки газов по сравнению с ее расчетным значением для одиночных циклонов несколько снижается. При очистке газов с высокой концентрацией пыли эффективность очистки увеличивается. Коэффициент очистки газов при концентрации пыли более $20 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ подсчитывается для неслипающихся пылей по следующей зависимости:

$$\eta_k = \eta_0 + \left(\frac{100 - \eta_0}{100} \right) 0,12 z_{\text{вх}} \lg(0,1 z_{\text{вх}}), \quad (7)$$

где η_0 – эффективность очистки при запыленности 10^{-2} кг/м³, определяется по формуле (5); $z_{\text{вх}}$ – концентрация пыли на входе в аппарат, г/м³. Формулой (7) можно пользоваться при концентрации пыли до 0,15 кг/м³.

Для повышения общей эффективности очистки газов циклоны могут быть установлены последовательно в каскады. Коэффициент проскока для каскада m циклонов, установленных последовательно, определяется по формуле

$$K_{\delta, k} = K_{\delta, 1} \cdot K_{\delta, 2} \cdot \dots \cdot K_{\delta, i}, \quad (8)$$

где $K_{\delta, i}$ – коэффициенты проскока циклонов НИИОГАЗ, рассчитываемые по зависимостям (1) – (4). Однако, как показано в работе [9], воспользовавшись экспериментальными данными и расчетными графиками [10], выражения для коэффициентов проскока для циклонов НИИОГАЗ можно привести к виду

$$K_{\delta} = \exp(-a \text{Stk}^n), \quad (9)$$

где a, n – постоянные, характеризующие тип циклона [9]; $\text{Stk} = \tau \frac{W_n}{D}$ – число Стокса для циклона.

По приведенным выше зависимостям (1) – (4), (8), (9) выполняются расчеты фракционных коэффициентов проскока в компьютерной программе «Расчет циклонов», а также определяются фракционные коэффициенты очистки в соответствии с формулой

$$\eta_{\delta} = 1 - K_{\delta}. \quad (10)$$

Общий коэффициент очистки может быть посчитан с достаточной для практических целей точностью [10] по фракционным коэффициентам очистки и фракционному составу пыли:

$$\eta = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n (\eta_{\text{фр}, i} \cdot \Phi_i), \quad (11)$$

где $\eta_{\text{фр}, i}$ – фракционные коэффициенты очистки газов в данном циклоне, %; Φ_i – весовое количество частиц данной фракции (процентное содержание

к общему количеству пыли); i – порядковый номер фракции, изменяющийся от 1 до n . Таким образом, при работе программы сначала рассчитываются фракционные коэффициенты очистки по формуле (10), а затем вычисляется общий коэффициент очистки по формуле (11).

Кроме расчета параметров, характеризующих эффективность очистки газа от пыли в циклонах НИИОгаз, компьютерная программа «Расчет циклонов» дает возможность определения гидравлического сопротивления циклонов. Согласно указаниям [10] зависимость коэффициента сопротивления циклона от его диаметра и концентрации пыли выражается формулами

$$\zeta_{\text{ц}}^c = K_1 K_2 \zeta_{\text{ц},500}^c, \quad (12)$$

$$\zeta_{\text{ц}}^n = K_1 K_2 \zeta_{\text{ц},500}^n, \quad (13)$$

где $\zeta_{\text{ц},500}^c$, $\zeta_{\text{ц},500}^n$ – коэффициенты полного сопротивления циклона и для сети [10] при $D = 500$ мм; K_1 , K_2 – поправочные коэффициенты на влияние диаметра циклона и запыленности газа соответственно [10].

На основании полученного значения коэффициента сопротивления циклона, зная плотность газов в рабочих условиях ρ_r , можно вычислить и соответствующие потери давления, Δp , по следующей формуле:

$$\Delta p = \zeta_{\text{ц}} \frac{\rho_r W_{\text{ц}}^2}{2}. \quad (14)$$

Справочные данные по коэффициентам K_1 и K_2 , приведенные в виде таблиц [10], для удобства использования в компьютерной программе аппроксимированы полиномиальными зависимостями.

Компьютерная программа «Расчет циклонов», реализующая описанные выше методы расчета пылегазоочистного оборудования, разработана с использованием языка программирования Delphi. На рис. 1 представлено основное рабочее окно программы.

Перед началом расчета необходимо ввести часть исходных данных, связанных с параметрами газа и частиц: Q_p – расход подаваемого газа, м³/ч; t – температуру воздуха, °С; $z_{\text{вх}}$ – запыленность газов на входе, 10³ кг/м³; μ – динамическую вязкость воздуха, Па·с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; ρ_m – плотность частиц пыли.

Далее, после того как будет указано количество фракций в улавливаемой пыли, следует задействовать кнопку «Ввести таблицу фракционного состава» и после появления специальной таблицы заполнить таблицу, содержащую данные об исходном составе пыли (размер фракций, мкм; граничный размер частиц, мкм; фракционный состав, %).

На первом этапе проводится расчет 1-го циклона, результаты которого включают фракционные коэффициенты проскока и очистки, общий коэффициент очистки, запыленность газов на выходе, медианный размер частиц, дисперсию на выходе, потери давления и коэффициент сопротивления в циклоне (рис. 2).

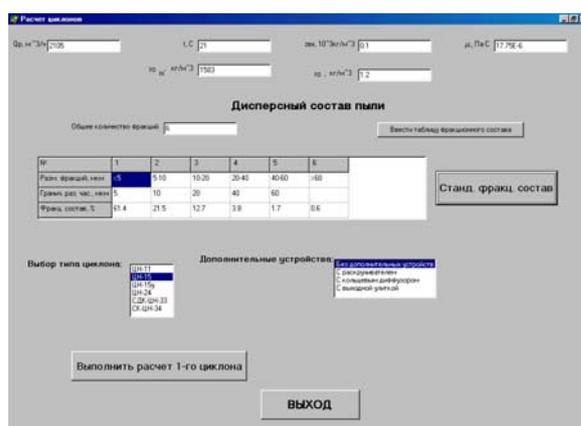


Рис. 1. Основное рабочее окно программы «Расчет циклонов»

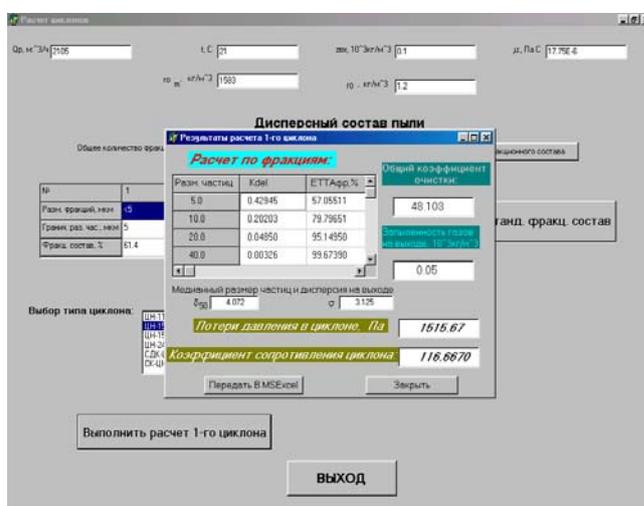


Рис. 2. Результаты расчета 1-го циклона в программе «Расчет циклонов»

На следующем этапе можно провести расчет каскада, состоящего из любого числа последовательно установленных циклонов. В итоге в специальной форме, показанной на рис. 3, будут отражены те же результаты, что и при расчете первого циклона, а также фракционные коэффициенты очистки и общий коэффициент очистки в каскаде. Все результаты расчета могут быть переданы в MS Excel при необходимости дальнейшей обработки.

Как показала эксплуатация реконструированной вытяжной системы вентиляции в цехе по опудриванию зефира фабрики «Красная звезда», компьютерная программа «Расчет циклонов» представляет собой средство, дающее возможность технологу быстро выполнить достаточно сложный и трудоемкий расчет циклонов, учитывающий изменение параметров воздуха в цехе или состава пыли сахарной пудры, для регулирования их режимов работы с целью обеспечения требуемой очистки газовых выбросов.

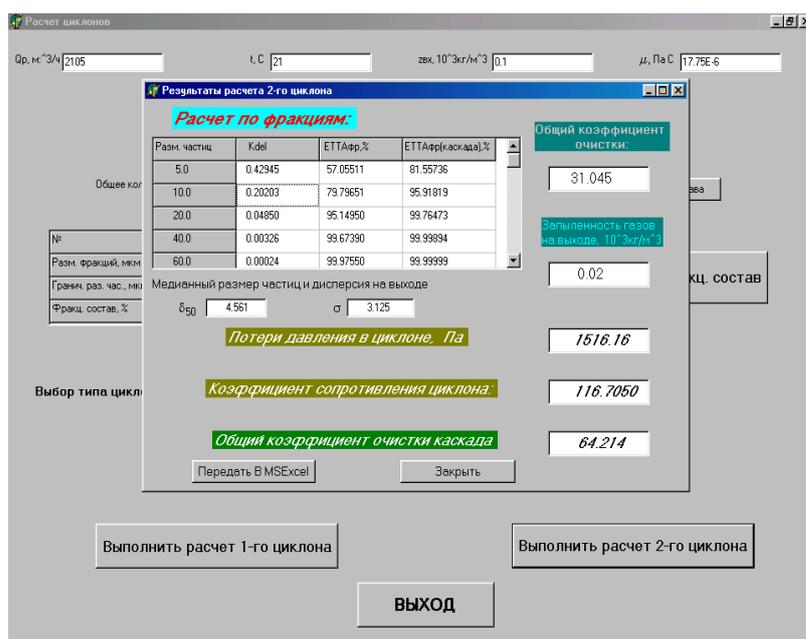


Рис. 3. Расчет каскада циклонов в программе «Расчет циклонов»

В табл. 2 представлен один из вариантов характеристик системы из двух последовательно установленных циклонов в цехе по опудриванию зефира, рассчитанный с помощью компьютерной программы «Расчет циклонов». В качестве исходных данных принимались значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета циклонов

Обозначение	Q_p	t	$z_{вх}$	ρ_m	ρ	μ
Размерность	$m^3/ч$	$^{\circ}C$	$10^{-3}кг/м^3$	$кг/м^3$	$кг/м^3$	Па·с
Значение	2105	21	0,1	1583	1,2	$17,75 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2

Результаты расчета каскада из двух циклонов

ЕТТА0	31,045
$Z_{вых}, 10^3, кг/м^3$	0,015
DEL50	4,561
SIGMA	3,125
DELp	3032,312
DZI	233,41
ЕТТАОкас	64,214

Окончание табл. 2

Расчет по фракциям			
DEL	Kdel	ЕТТАфр	ЕТТАфр каскада
5,0	0,42945	57,05511	81,55736
10,0	0,20203	79,79651	95,91819
20,0	0,04850	95,14950	99,76473
40,0	0,00326	99,67390	99,99894
60,0	0,00024	99,97550	99,99999

Таким образом, компьютерная программа «Расчет циклонов» позволяет рассчитывать фракционные коэффициенты очистки, дисперсию, медианный размер улавливаемых частиц и потери давления в отдельных циклонах НИИОГАЗ и их каскадах, работающих в любом диапазоне исходных параметров. В исходных данных программы учтены все конструктивные параметры циклонов и характеристики пыли, влияющие на определение эффективных режимов работы пылегазоочистного оборудования. Разработанная программа может быть использована для регулирования работы систем промышленной вентиляции, выбросы которых очищаются от пыли в циклонах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фирсов, Д.Н.* Современные технологии в аспирации и газоочистке (ООО ТД «Эко-фильтр») / Д.Н. Фирсов // Сб. докладов VII Международной конференции пылегазоочистка-2014. – М. : ООО «Интехэко», 2014. – С. 7–10.
2. *Горелкин, Д.Н.* Комплексные решения в области пылегазоочистки на примере проектов, реализованных ЗАО «СовПлим» / Д.Н. Горелкин // Сб. докладов VII Международной конференции «ПЫЛЕГАЗООЧИСТКА-2014». – М. : ООО «Интехэко», 2014. – С. 32–35.
3. *Чекалов, Л.В.* Формула газоочистки / Л.С. Чекалов. – Семибратово : Кондор-Эко, 2008. – 224 с.
4. *Приходько, В.П.* Основные принципы создания энергосберегающих устройств циклонного типа / В.П. Приходько, О.А. Пирогова, Е.М. Прохоров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 10. – С. 32–33.
5. *Шиляев, М.И.* Оптимизация компоновки инерционных пылеуловителей / М.И. Шиляев, Ю.Н. Дорошенко // Материалы I Международной научно-практической конференции «Проблемы строительного производства и управления недвижимостью». – Кемерово : КузГТУ, 2010. – С. 239–244.
6. *Соболев, А.В.* Математическое моделирование процесса пылеулавливания в многосекционном циклоне : дис. ... канд. техн. наук. – Брянск, 2005. – 154 с.
7. *Бубенчиков, М.А.* Расчет аэродинамики циклонной камеры / М.А. Бубенчиков, И.А. Иванова // Вестник Томского государственного университета. – 2011. – Т. 13. – № 1. – С. 67–73.
8. *Асламова, В.С.* Автоматизированная система исследования циклонов и скрубберов / В.С. Асламова, А.А. Жабей // Известия Томского политехнического университета. Энергетика. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 71–76.
9. *Шиляев, М.И.* Методы расчета пылеулавливающих систем / М.И. Шиляев. – М. : Форум, 2013. – 402 с.
10. *Циклоны НИИОгаз*: Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. – Ярославль : Ярославское книжное издательство, 1970. – 250 с.

REFERENCES

1. *Firsov D.N.* Sovremennye tekhnologii v aspiratsii i gazoочистке (ООО ТД 'Ekofiltr') [Modern technology in gas extraction and cleaning (ООО ТД "Ekofiltr")]. *Coll. Papers 7st Int. Conf. 'Dust and Gas Treatment 2014'*. Moscow : ООО 'Intekheko', 2014. Pp. 7–10. (rus)
2. *Gorelkin D.N.* Kompleksnye resheniya v oblasti pylegazoочистки na primere proektov, realizovannykh ZAO «SovPlim» [Integrated solutions on gas treatment implemented by ZAO 'SovPlim']. *Coll. Papers 7st Int. Conf. 'Dust and Gas Treatment 2014'*. Moscow : ООО 'Intekheko', 2014. Pp. 32–35. (rus)
3. *Chekalov L.V.* Formula gazoочистки [Gas treatment scheme]. Semibratovo : 'Kondor-Eko', 2008. 224 p. (rus)
4. *Prikhod'ko V.P., Pirogova O.A., Prokhorov E.M.* Osnovnye printsipy sozdaniya energosberegayushchikh ustroystv tsiklonnogo tipa [Basic principles of energy-saving cyclone devices]. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2006. No. 10. Pp. 32–33. (rus)
5. *Shilyaev M.I.* Optimizatsiya komponovki inertsiionnykh pyleulovitelei [Optimization of inertial dust collector configuration]. *Proc. 1st Int. Sci. Conf. 'Problems of Construction Industry and Real Estate Management'*. Kemerovo : KuzSTU Publ., 2010. Pp. 239–244. (rus)
6. *Sobolev A.V.* Matematicheskoe modelirovanie protsessa pyleulavlivaniya v mnogosektsionnom tsiklone [Mathematical simulation of dust collection in multisection cyclone. PhD thesis]. Bryansk, 2005. 154 p. (rus)
7. *Bubenchikov M.A., Ivanova I.A.* Raschet aerodinamiki tsiklonnoi kamery [Aerodynamic computations of cyclone chamber]. *Vestnik TSUAB*. 2011. V. 13. No. 1. Pp. 67–73. (rus)
8. *Aslamova V.S., Zhabei A.A.* Avtomatizirovannaya sistema issledovaniya tsiklonov i skrubberov [Automated system for research cyclones and scrubbers]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Energetics*. 2010. V. 316. No. 4. Pp. 71–76. (rus)
9. *Shilyaev M.I.* Metody rascheta pyleulavlivayushchikh sistem [Methods for calculating the dust collecting systems]. Moscow : Forum, 2013. 402 p. (rus)
10. *Tsiklony NIIOgaz*: Rukovodyashchie ukazaniya po proektirovaniyu, izgotovleniyu, montazhu i ekspluatatsii [Guidelines for design, construction, installation and operation]. Yaroslavl' : Yaroslavl'skoe knizhnoe izdatel'stvo, 1970. 250 p. (rus)