Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Н.И. Ватин;
к.т.н., доцент А.А. Гиргидов;
к.т.н., доцент К.И. Стрелец*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: циклон; гидравлическая крупность; распределение скорости; осевая скорость

Использование циклонов для удаления твердых и жидких включений (пыли, капель, взвешенных частиц) из газа (в частности воздуха) и из жидкостей (воды, нефти) обусловлено надежностью и простотой устройства при небольших капитальных и эксплуатационных затратах. В настоящей статье будем рассматривать циклоны, используемые для пылеудаления из воздуха рабочей зоны производственных помещений. Наиболее распространенным типом таких устройств является противоточный циклон с тангенциальным подводом воздуха (рис. 1).

В соответствии с [2], будем рассматривать циклон с цилиндрическим корпусом, с внутренним радиусом R и радиусом отводящей трубы r_0. При этом воздух подводится через входной патрубок прямоугольного сечения с вертикальным ребром h и горизонтальным ребром $b = (R - r_0)$ со скоростью v_0. Такие циклоны, как правило, имеют вертикальную ось z, и частицы пыли удаляются из потока за счет их движения к стенке циклона под действием сил инерции (в данном случае направленных перпендикулярно оси циклона и поэтому в дальнейшем называемых центробежными) [4]. Движение частиц вниз вдоль внешней стенки циклона происходит за счет осевой составляющей скорости v_z и под действием силы тяжести.

При гидравлическом расчете циклонов винтовой поток пылесодержащего воздуха в рабочей части тела циклона считается однородным вдоль оси z, так что представляется возможным «расщепление» процесса удаления на две независимые части.

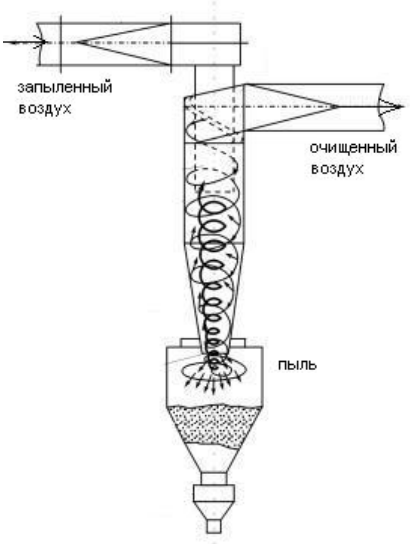


Рисунок 1. Противоточный циклон с тангенциальным локальным подводом воздуха [1]

1. Осевой поток вдоль оси z со средней скоростью:

$$v_z = \frac{v_0 (R - r_0)^2}{\pi (R^2 - r^2)_0} \quad . \tag{1}$$

2. Тангенциальный осесимметричный поток, благодаря переносу которым частица пыли под действием сил инерции перемещается к стенке циклона и осаждается на ней. Тангенциальная скорость u_ε движения воздуха определяет величину центробежного ускорения, поэтому распределение ее значения вдоль радиальной координаты r является существенным фактором, от которого зависит эффективность пылеудаления в циклоне [4].

Для вычисления распределения тангенциальной скорости $u_\varepsilon = u_\varepsilon(r)$ обычно используют гипотезу о том, что внутри циклона формируется поле тангенциальной скорости такое же, как и в свободном вихре [2,5,6]:

$$u_\varepsilon = \frac{u_0 r_0}{r}, \tag{2}$$

где u_0 – скорость на внешней поверхности отводящего патрубка, которая определяется по средней скорости тангенциального движения u_ε согласно равенству:

$$v_\varepsilon (R - r) = \int_{r_0}^{R} \frac{u_\varepsilon^0 r_0}{r} dr = u_\varepsilon^0 r_0 \ln \frac{R}{r_0}. \tag{3}$$

При таком подходе считается, что ввиду малости осевой скорости v_z средняя тангенциальная скорость практически равна скорости подвода воздуха в циклон, т.е. $v_\varepsilon = v_0$, а поток не расширяется вдоль оси z и имеет форму спирали с постоянным шагом [7,8].

Приведенные выше гипотезы о поле скорости внутри циклона не имеют убедительной экспериментальной проверки, а поэтому достоверность результатов расчетов, основанных на таких модельных представлениях, всегда можно поставить под сомнение.

Дополнительным фактором, обуславливающем необходимость экспериментального изучения поля скорости воздуха внутри циклона, является практически полное отсутствие в литературе сведений о поле пульсационной скорости u'_r в воздушном потоке.

Максимальные значения этой пульсационной скорости ограничивают крупность частиц пыли, которые могут быть удалены из потока [9]. Более того, интересны для оценки эффективности циклона не только максимальные значения u'_r, но и распределение этой величины вдоль координаты r, так как центробежная гидравлическая крупность частиц $w_{цб}$, от которой зависит скорость u_r удаления частиц пыли от оси z [9], определяется следующей зависимостью:

$$w_{цб} = w\frac{(u_\varepsilon(r))^2}{gr}, \qquad (4)$$

где w – гравитационная гидравлическая крупность частиц [3,9,10];
g – ускорение силы тяжести.

Обязательным условием удаления частиц из циклона, т.е. их оседания на внешнюю стенку, является следующее: центробежная гидравлическая крупность должна быть больше пульсационной скорости во всех точках по координате r. В случае если $w_{цб} < u'_r$, частицы могут неограниченно долго перемещаться с окружной скоростью потока. Поэтому при увеличении пульсационной скорости эффективность пылеудаления, в особенности для мелких частиц, снижается. С этим связано ограничение по минимальной гидравлической крупности w удаляемых частиц.

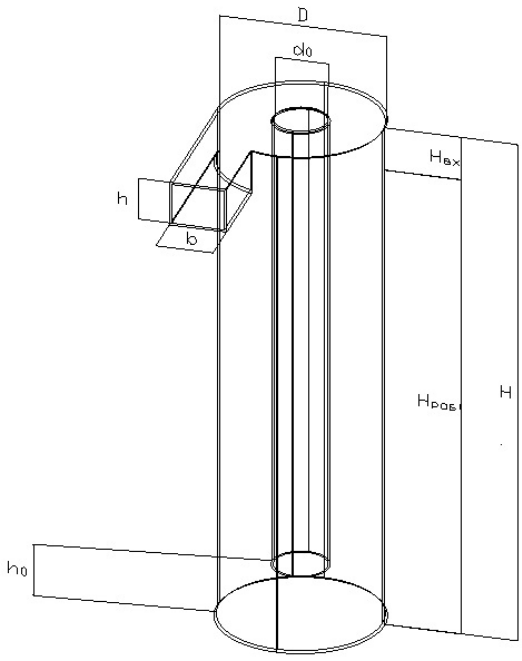


Рисунок 2. Схема циклона с подсоединением входного патрубка под углом 90°

Исследования поля осредненной и, в особенности, пульсационной скоростей на основе физического моделирования воздушного потока в теле циклона сопряжено с большими, порой технически непреодолимыми трудностями (существенно трехмерное движение воздуха, сложная конфигурация границ потока и т.п.) Поэтому было предпринято математическое моделирование турбулентного потока газа в циклоне, основанное на решении трехмерных уравнений Навье-Стокса. Возможность прямого численного решения этих уравнений для турбулентного потока в теле циклона не обеспечена современной вычислительной техникой, и поэтому была использована $k-\varepsilon$ модель турбулентности, что обеспечило не только определение поля тангенциальной скорости u_ε, но и возможность оценки поля пульсационной скорости. Вычисления выполнялись с помощью программного комплекса Flow 3D. При проведении численного моделирования скорости на входе в циклон задавались таким образом, чтобы обеспечивался развитый турбулентный режим.

В соответствии с экспериментальными данными, поток воздуха в циклоне можно разделить на входную часть, высотой $H_{вх}$, в которой после подвода воздуха происходит переформирование потока и образуется осесимметричный поток газа; рабочую часть, высотой $H_{раб}$, где сформировано осесимметричное поле скорости, на которой происходит осаждение частиц в расчетном режиме; выходную часть, высотой h_0, ниже рабочей зоны, где также происходит сильная деформация потока при его входе в отводящий патрубок (рис. 2).

Во входной части циклона поле скорости существенно неоднородно и характеризуется наличием водоворотных областей (рис. 3). Чтобы исключить образование водоворотных областей, для упорядочивания потока в циклоне было предложено провести также исследования конструкции циклона с устройством входной части в форме «направляющей крышки» (рис. 4) [11].

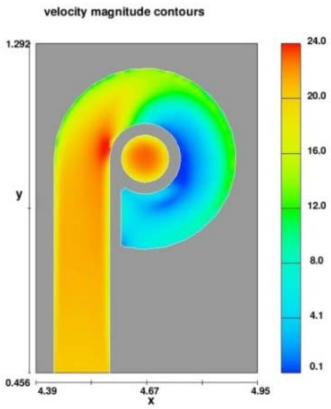


Рисунок 3. Образование водоворотных областей во входной части циклона (выделены синим цветом)

Рисунок 4. Схема циклона с подсоединением входного с «направляющей крышкой»

Численное моделирование было проведено для следующих геометрических параметров циклона (табл. 1) .

Таблица 1. Расчет потока в циклоне

№ изм	$\frac{r_0}{R}$	$\frac{b}{h}$	$\frac{H_{вх}}{d_0}$	Подсоединение входного патрубка	$\frac{a}{d_0}$	$\frac{H}{H_0}$	Коническая часть
1	0,3	>1	1,6	под углом 90°	1	1	-
2	0,4	1	1,6	под углом 90°	1	1	-
3	0,5	<1	1,6	под углом 90°	1	1	-
4	0,4	1	0	«направляющая крышка»	1	1	-
5	0,4	1	1,6	под углом 90°	3	1	-
6	0,4	1	1,6	под углом 90°	1	1	+
7	0,4	1	1,6	под углом 90°	1	2	-

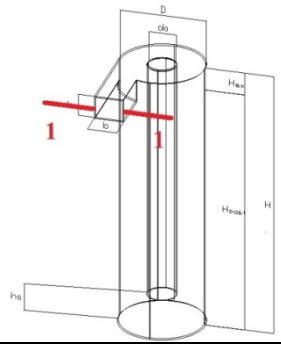
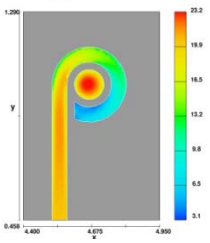
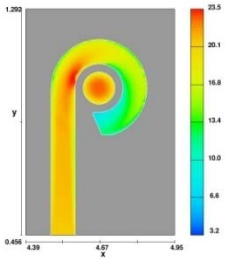
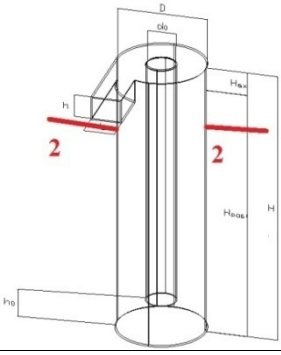
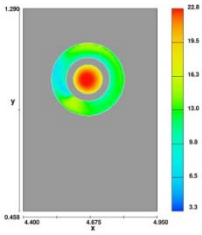
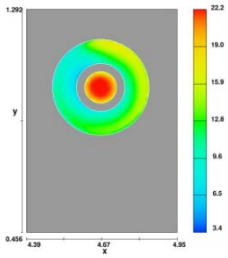
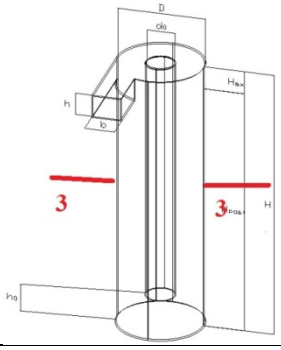
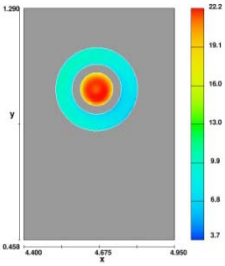
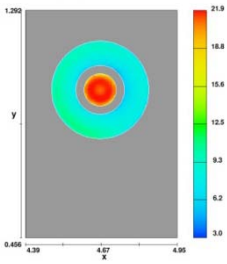
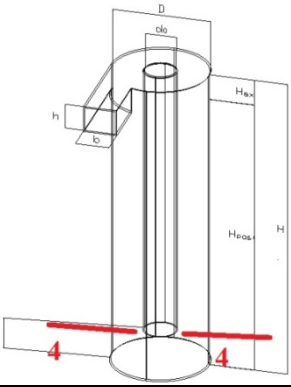
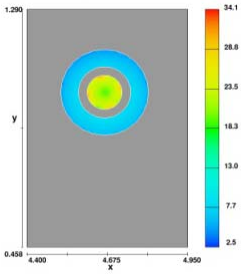
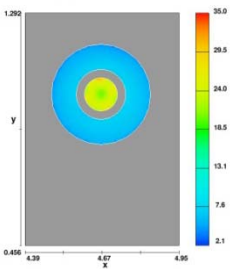
Результаты экспериментальных исследований показали следующее.

1. Высота $H_{вх}$ входного участка циклона (рис. 2), где происходит деформация потока от параллельноструйного на входе в циклон из подводящего прямоугольного воздуховода до расчетного осесимметричного потока в рабочей (расчетной) части, составляет $H_{вх} = 3{,}2r_0$.
2. Осредненная тангенциальная скорость u_ε в рабочей части циклона практически не зависит от r , т.е. использование модели свободного вихря для ее описания непригодно (табл. 2).
3. Среднее по радиусу значение тангенциальной скорости v_ε убывает по мере удаления от входа, от значений $v_\varepsilon = 0{,}6v_0$ в начале рабочей части циклона до $v_\varepsilon = 0{,}25v_0$ в конце (табл. 2).
4. Значения пульсационной скорости составляют 7-10% от осредненной тангенциальной скорости u_ε , что соответствует интенсивности турбулентности в продольно-однородных потоках в трубах. Устойчивая зависимость этих значений от радиальной координаты r не обнаружено (табл. 2).
5. Гидравлические потери напора от входа в циклон до выхода через отводящий патрубок пропорциональны квадрату расхода.
6. Устройство направляющей крышки уменьшает длину входной части циклона (рис. 2), но эффективность пылеудаления существенно не повышается, так как расширение потока в осевом направлении при наличии крышки не исключается (табл. 2).

Наиболее важным представляется результат №3, согласно которому тангенциальный поток воздуха, попадая в циклон, расширяется в осевом направлении. В результате этого средняя тангенциальная скорость v_ε уменьшается вдоль оси z . Таким образом, общепринятая в настоящее время гипотеза о продольной (вдоль оси x) однородности потока не подтверждается численным моделированием. Следовательно,

значения эффективности пылеудаления, рассчитанные на основании этой гипотезы, существенно завышены. Это связано с тем, что, хотя расстояния тангенциального переноса частиц пыли уменьшаются пропорционально v_ε (и частицы имеют больше возможностей выпасть на стенку циклона за счет этого фактора), центробежная гидравлическая крупность согласно формуле (4) уменьшается пропорционально квадрату v_ε, что приводит к тому, что значительная часть пыли не достигнет стенки циклона.

Таблица 2. Поле осредненной тангенциальной скорости по высоте циклона, значения средней тангенциальной скорости по высоте циклона

		Подсоединение входного патрубка и крышки: под углом 90^0	**Подсоединение входного патрубка и крышки: «направляющая крышка»**
№ сечения по высоте циклона		u_ε $v_{\varepsilon 0} = 20 м/с$	u_ε $v_{\varepsilon 0} = 20 м/с$
1		 $v_{\varepsilon 1} = 13{,}2 м/с$	 $v_{\varepsilon 4} = 18 м/с$
2		 $v_{\varepsilon 2} = 13 м/с$	 $v_{\varepsilon 4} = 14 м/с$
3		 $v_{\varepsilon 3} = 8 м/с$	 $v_{\varepsilon 4} = 7{,}8 м/с$
4		 $v_{\varepsilon 4} = 4 м/с$	 $v_{\varepsilon 4} = 4 м/с$

Проведенные исследования поля скорости показали, что для циклонов существующих конструкций используемое «расщепление» и независимый расчет движения частиц может привести к завышенным значениям эффективности пылеудаления в циклоне.

Имея это в виду, для расчета эффективности, в особенности для мелких частиц, рекомендуется, если есть такая возможность, выполнить с помощью численного моделирования с использованием универсальных пакетов программ, не только расчет полей скорости движения воздуха внутри циклона, но и движения и осаждения самих частиц пыли.

Следует отметить, что для таких расчетов необходимо задавать значения гравитационной гидравлической крупности частиц w. Значения этой величины обычно рассчитываются для отдельно движущихся частиц [12,13]. Однако даже при незначительных концентрациях частиц гидравлическая крупность является функцией не только плотности и размеров частиц, но и их концентрации.

Наиболее важным средством повышения эффективности циклона, особенно при улавливании мелких частиц, является уменьшение расширения потока газа в осевом направлении при его вращательном движении в циклоне. Это может быть достигнуто путем изменения конструкции циклона. Одним из возможных путей решения является уменьшение радиуса циклона и придание входному патрубку прямоугольной формы, вытянутой вдоль оси циклона. Исследованию подобных конструкций посвящен ряд работ, в которых приведены результаты опытного исследования, однако отсутствует обоснование эффективности подобных изменений конструкции циклона [14].

Для усовершенствования конструкций циклонов необходимо, во-первых, математическое моделирование осаждения частиц в трехмерном закрученном турбулентном потоке газа, во-вторых, проверка работы конструкции в производственных условиях.

Литература

1. Hoffmann A. C., Stein L. E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verl., 2002. 421 p.
2. Штокман Е. А., Шилов В. А., Новгорадский Е. Е., Саввиди И. И., Скорик Т. А., Пашков В. В. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха. М. : Изд-во Ассоциации строительных высших учебных заведений, 2001. 688 с.
3. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
4. Стрелец К. И. Оценка эффективности осаждения частиц в циклонах пылеудаления в циклоне // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 4. С. 138-143.
5. Шиляев М. И., Дорохов А. П. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТГАСУ, 1999. 209 с.
6. Шиляев М. И., Шиляев А. М., Грищенко Е. П. Методы расчета пылеуловителей : учеб. пособие для студ. вузов. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2006. 384 с.
7. Syeda Noori Banu P., Syeda Arshi Banu P.. Simulation and empirical modeling of a Design of Cyclonic separator to combat air pollution // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. Vol. 3. No. 6. Pp. 4857-4878.
8. Zhongchao Tan. Mechanism of particle separation in aerodynamic air cleaning : PhD. Illinois : Urbana, 2004. 14 p.
9. Стрелец К. И. О характеристиках пыли, используемых при расчете эффективности пылеудаления в циклоне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 110. С. 222-226.
10. Гиргидов А. Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью / СПбГТУ. СПб. , 1996. 259 с.
11. Штокман Е. А. Очистка воздуха. М. : АСВ, 1998. 320 с.
12. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды / пер. с англ. В.А. Хохрякова и Л.К. Эрдмана. М. : Мир, 1980. 549 с.
13. Титьенс О. Гидро- и аэромеханика. В 2 т. / по лекциям профессора Л.Прандтль, пер. с нем. Г.А. Вольперта. М. : Государственное технико-теоретическое издательство, 1932. 222 с.
14. Rus F., Ciulică L. G. Marinuc mirela experimental research regarding the influence of inlet geometry and air stream characteristics over separation efficiency // Journal of Engineering Studies and Research. 2011. Vol. 17. No. 2. Pp. 83-85.

**Ксения Игоревна Стрелец, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)552-94-60; эл. почта: kstrelets@mail.ru

Numerical modelling the three-dimensional velocity field in the cyclone

N.I. Vatin;
A.A. Girgidov;
K.I. Strelets,
Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia,
+7(812) 552-94-60; e-mail: kstrelets@mail.ru

Key words

cyclone; free-falling velocity; tangential velocity; distribution of velocity; axial velocity

Abstract

The urgency of work is determined by the importance of developing methods for calculating cyclones and improving their design, due to popular usage cyclones for air cleaning.

The efficiency of dust cleaning depends on the velocity distribution in the body of cyclone. Researches of the distribution of tangential velocity and turbulent velocity on the basis of physical modeling of air flow in the body of the cyclone is associated with large, sometimes technically insurmountable difficulties (essentially three-dimensional movement of air, a complex configuration limits the flow, etc.). Therefore, mathematical modeling of turbulent gas flow in the cyclone was made.

Mathematical modeling provided data on the distribution of velocity in the cyclone. Most important result is that the tangential flow of air entering the cyclone, expands in the axial direction, which leads to lower efficiency extraction. To eliminate this effect the design of the cyclones should be improved.

References

1. Hoffmann A. C., Stein L. E. *Gas Cyclones and Swirl Tubes*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verl, 2002. 421 p.
2. Shtokman E. A., Shilov V. A., Novgoradskiy E. E., Savvidi I. I., Skorik T. A., Pashkov V. V. *Ventilyatsiya, konditsionirovanie i ochistka vozdukha* [Ventilation, air conditioning and air purification]. Moscow, Izd-vo Assotsiatsii stroitelnykh vysshikh uchebnykh zavedeniy, 2001. 688 p. (rus)
3. Girgidov A. D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika)* [Fluid mechanics (hydraulics)]. Saint-Petersburg, Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 545 p. (rus)
4. Strelets K. I. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2010. No. 4. Pp. 138-143. (rus)
5. Shilyaev M. I., Dorokhov A. P. *Metody rascheta i printsipy komponovki pyleulavlivayushchego oborudovaniya* : ucheb. posobie [The calculation methods and arrangement principles of dust-collecting equipment : manual]. Tomsk : Izd-vo TGASU, 1999. 209 p. (rus)
6. Shilyaev M. I., Shilyaev A. M., Grishchenko E. P. *Metody rascheta pyleuloviteley* : ucheb. posobie dlya stud. vuzov [Methods of calculation the dust separators : manual for students]. Tomsk : Izd-vo TGASU, 2006. 384 p. (rus)
7. Syeda Noori Banu P., Syeda Arshi Banu P. Simulation and empirical modeling of a Design of Cyclonic separator to combat air pollution. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2011. Vol. 3. No. 6. Pp. 4857-4878.
8. Zhongchao Tan. *Mechanism of particle separation in aerodynamic air cleaning* : PhD. Illinois : Urbana, 2004. 14 p.
9. Strelets K. I. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.* 2010. No. 110. Pp. 222-226. (rus)
10. Girgidov A. D. *Turbulentnaya diffuziya s konechnoy skorostyu* [Turbulent diffusion of finite velocity] / SPbGTU. SPb. , 1996. 259 p. (rus)
11. SHtokman E. A. *Ochistka vozdukha* [Air purification]. Moscow : ASV, 1998. 320 p. (rus)
12. Skorer R. *Aerogidrodinamika okruzhayushchey sredy* [Environmental aerodynamics] / per. s angl. V.A. Khokhryakova i L.K. Erdmana. Moscow : Mir, 1980. 549 p. (rus)
13. Titiens O. *Gidro- i aeromekhanika* [Hydro- and Aeromechanics]. In 2 vol. / po lektsiyam professora L.Prandtl, per. s nem. G.A. Volperta. Moscow : Gosudarstvennoe tekhniko-teoreticheskoe izdatelstvo, 1932. 222 p. (rus)
14. Rus F., Ciulică L. G. Marinuc mirela experimental research regarding the influence of inlet geometry and air stream characteristics over separation efficiency. *Journal of Engineering Studies and Research*. 2011. Vol. 17. No. 2. Pp. 83-85.

Full text of this article in Russian: pp. 5-9