

УДК 621.928.37 + 621.928.93

Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, О. А. Петров

Белорусский государственный технологический университет

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ЦИКЛОНА СЦН-40**

В статье представлены конструкция и характерные признаки современного циклона СЦН-40, обуславливающие как высокую эффективность, так и значительный коэффициент гидравлического сопротивления циклонов такого типа. Проведен аналитический обзор имеющихся в литературе сведений о величине обоих видов коэффициента гидравлического сопротивления циклона СЦН-40: приведенного к условной скорости газа в циклоне и к средней скорости газа во входном патрубке. Выявлено, что данные различных авторов по этому вопросу весьма противоречивы, и, в частности, дают значительный разброс величины коэффициента гидравлического сопротивления циклона названного типа. Приведены результаты собственных исследований гидравлического сопротивления циклона СЦН-40, полученных как в ходе реального эксперимента на модели диаметром 0,24 м по стандартной методике определения потерь давления в циклонах, так и в ходе виртуального эксперимента численным методом с использованием вычислительной гидродинамики, где газовый поток рассчитывался методом Эйлера, в котором параметры потока являются функциями пространственных координат и времени, представляя поля. В результате приведены графические зависимости потерь давления и коэффициента гидравлического сопротивления от условной скорости газа в циклоне, показывающие, что, по данным как реального, так и численного экспериментов, коэффициент гидравлического сопротивления не является постоянной величиной в широком диапазоне условной скорости газа, возрастая вместе с ней. При этом область увеличения коэффициента сопротивления охватывает и рабочий диапазон условной скорости газа, что говорит о необходимости внесения уточнений в методику расчета потерь давления для данного типа циклонов.

Ключевые слова: циклон, гидравлическое сопротивление, коэффициент сопротивления.

D. I. Misyulya, V. V. Kuz'min, O. A. Petrov

Belarusian State Technological University

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL CALCULATION OF PRESSURE DROP
IN A HIGH-EFFICIENCY CYCLONE STsN-40**

The paper presents the design and the characteristics of the modern cyclone STsN-40 having both a high efficiency and a considerable pressure drop coefficient. An analytical review of available in literature information about the value of both types of pressure drop coefficient of the cyclone STsN-40 was realised. It was normalized by a conditional gas velocity in the cyclone and the average flow velocity in the inlet pipe. It was found that the data of different authors on the subject is very controversial, and, in particular, provide a significant variation of the pressure drop coefficient of the given cyclone type. Both the experimental and numerical results of pressure drop of 0.24 m in diameter cyclone STsN-40 are given. Experimental results were obtained according to the standard method of determining the pressure loss in cyclones, and numerical investigation was done using a numerical method of computational fluid dynamics, where the gas phase flow was treated in a Eulerian manner, where the flow variables are a function of space and time, thus are represented as fields. The derived pressure-drop-vs-gas-velocity and pressure-drop-coefficient-vs-gas-velocity plots are presented. They show that, according to both real and numerical experiments pressure drop coefficient is not constant over a wide range of conventional gas velocity. It is constantly increasing with it. At the same time, this area of increasing pressure drop coefficient covers the operating range of conventional gas velocity, which indicates the need to make adjustments to the methodology for calculating the pressure drop for this type of cyclones.

Key words: cyclone, pressure drop, pressure drop coefficient.

Введение. Циклоны широко используются для очистки газов от пыли в различных отраслях промышленности, получив наибольшее распространение среди других пылеуловителей благодаря простоте конструкции и надежности работы. Сепарация взвешенных частиц из газо-

вого потока в циклонах происходит под действием центробежных сил, возникающих вследствие закручивания потока в неподвижном корпусе аппарата.

В настоящее время все более широкое применение получают циклоны СЦН-40, являю-

щиеся самым эффективным типом циклонов НИИОГАЗ [1]. Однако при выборе типа циклона, помимо эффективности очистки, необходимо учитывать и энергетические затраты на очистку газа, которые определяются гидравлическим сопротивлением циклона. Поскольку приведенные в справочной литературе сведения по величине коэффициента гидравлического сопротивления циклона СЦН-40 весьма противоречивы [3–11], целью исследования авторов являлось уточнение данного параметра, необходимого при практическом выборе и расчете циклонов.

Основная часть. Основными параметрами, характеризующими работу циклона, являются эффективность улавливания и гидравлическое сопротивление.

Отличительными особенностями циклона СЦН-40, обуславливающими высокую степень очистки газа в нем, являются плоский (без наклона) спиральный вход газа в корпус аппарата и относительно малые площади проходного сечения входного патрубка и выхлопной трубы. Внутренний диаметр выхлопной трубы d у циклонов СЦН-40 составляет 0,4 от внутреннего диаметра корпуса D аппарата (рис. 1), в то время как у наиболее распространенных циклонов ЦН-11 и ЦН-15, имеющих наклонный тангенциальный входной патрубков, этот параметр практически в полтора раза больше (0,59D). Данные конструктивные особенности циклона СЦН-40, характерные и для ряда других высокоэффективных циклонов (таких, например, как СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34), приводят также к повышению гидравлического сопротивления и энергетических затрат на очистку газа.

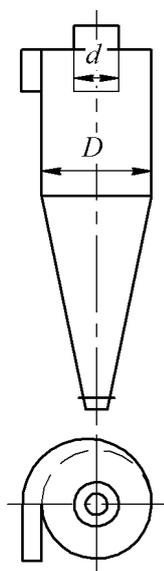


Рис. 1. Высокоэффективный циклон СЦН-40

Гидравлическое сопротивление циклонов Δp , Па, определяют по формуле

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho w^2}{2},$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления циклона; ρ – плотность газа, кг/м³; w – условная скорость газа в циклоне, м/с.

Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов разных типов существенно отличаются, возрастая вместе с эффективностью пылеулавливания.

В литературе часто приводятся два коэффициента гидравлических сопротивлений циклона (приведенные к условной скорости потока ζ и к средней скорости газа во входном патрубке $\zeta_{вх}$):

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{\rho w^2}, \quad \zeta_{вх} = \frac{2\Delta p}{\rho w_{вх}^2},$$

где w , $w_{вх}$ – условная скорость газа в циклоне (скорость в плане) и средняя скорость во входном патрубке соответственно, м/с.

Условная и средняя скорость газа во входном патрубке циклона определяются из соотношения

$$w = \frac{4Q}{\pi D^2}, \quad w_{вх} = \frac{Q}{S_{вх}},$$

где Q – объемная производительность (расход газа), м³/с; $S_{вх}$ – площадь входного сечения циклона, м².

Коэффициент гидравлического сопротивления для каждого типа циклонного аппарата обычно устанавливается опытным путем на чистом (незапыленном) газе и принимается постоянной величиной. При экспериментальном определении коэффициента сопротивления следует различать два основных случая работы одиночных циклонов [1]:

1) «в сети» – поток из циклона выходит в газовый тракт через длинный (более 10 диаметров) прямой выходной участок с диаметром, равным диаметру выхлопного патрубка циклона;

2) «на выхлоп» – выход потока из циклона осуществляется непосредственно в большой объем или атмосферу.

В случае работы циклона в сети к потерям давления, имеющим место непосредственно в циклоне, прибавляются невосполнимые потери, связанные с раскручиванием и выравниванием газового потока за циклоном. Эти потери принимаются неотъемлемой частью «местных» потерь в циклоне и включаются в величину коэффициента гидравлического сопротивления.

При работе циклона на выхлоп потерянной является вся кинетическая энергия вращающегося потока, выходящего из циклона. Эта энергия больше энергии, теряемой в прямом выходном участке при раскручивании потока, примерно на величину скоростного давления, рассчитанного по средней скорости в сечении выхлопного патрубка [2]:

$$\frac{\rho w_{\text{вых}}^2}{2} = \frac{\rho w^2}{2} \left(\frac{F}{F_{\text{вых}}} \right)^2 = \frac{\rho w^2}{2} \left(\frac{D}{d} \right)^4,$$

где $w_{\text{вых}}$ – средняя скорость потока в сечении выхлопного патрубка, м/с; F , $F_{\text{вых}}$ – площадь рабочего и выходного сечения циклона соответственно, м².

Поэтому существует приближенная связь

$$\Delta p^{\text{в}} = \Delta p^{\text{с}} + \frac{\rho w^2}{2} \left(\frac{D}{d} \right)^4,$$

где $\Delta p^{\text{в}}$, $\Delta p^{\text{с}}$ – полные потери давления в циклоне или его гидравлическое сопротивление при работе на выхлоп и в сети соответственно, Па.

Коэффициенты гидравлического сопротивления циклона при работе в сети $\zeta^{\text{с}}$ и на выхлоп $\zeta^{\text{в}}$, приведенные к условной скорости газа, можно описать следующей зависимостью:

$$\zeta^{\text{в}} = \zeta^{\text{с}} + \left(\frac{D}{d} \right)^4.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления для циклона СЦН-40 определялся несколькими авторами, однако результаты их исследований значительно отличаются друг от друга (таблица). Как видно из таблицы, значения коэффициента гидравлического сопротивления для циклона диаметром 0,3 м изменяются в диапазоне 950–1420, т. е. минимальное и максимальное значения отличаются в полтора раза. Кроме того, данные одних авторов, приведенные в работах [3–5, 7], говорят о том, что коэффициент гидравлического сопротивления

циклона СЦН-40 не зависит от диаметра аппарата, в то время как по данным других авторов [5, 7] величина ζ возрастает с увеличением диаметра и поправочный коэффициент, учитывающий влияние диаметра аппарата для циклона СЦН-40 диаметром 0,3–2,0 м, определяется по уравнению

$$k = 0,925 + 0,25D.$$

Сравнительный анализ коэффициентов гидравлического сопротивления циклона затрудняется также тем, что не все авторы приводят значение скорости газа, при которой производилось определение коэффициента ζ . Однако известно [12], что величина ζ является функцией условной скорости газа, что также может быть одной из причин в расхождении величин коэффициента гидравлического сопротивления у разных авторов. Например, коэффициент ζ для циклона ЦН-15 возрастает до значения w примерно равного 3,0–3,5 м/с, после чего становится постоянным. Поскольку рабочий диапазон условной скорости для циклона СЦН-40 лежит в пределах от 1,3 до 1,9 м/с, то весьма актуальным является также и изучение влияния скорости газа на коэффициент гидравлического сопротивления циклона СЦН-40.

Поэтому целью авторов являлось как уточнение величины коэффициента гидравлического сопротивления высокоэффективного циклона СЦН-40, так и изучение влияния на него условной скорости газа. Исследование данного вопроса производилось как в ходе реального эксперимента, так и численным методом.

В реальных условиях исследования гидравлического сопротивления проводились при работе циклона СЦН-40 с внутренним диаметром 0,24 м на выхлоп по стандартной методике определения потерь давления в циклонах на экспериментальной установке, подробно описанной в работе [13]. Экспериментальные измерения гидравлического сопротивления повторялись 3 раза.

Сравнительная характеристика коэффициентов гидравлического сопротивления высокоэффективного циклона СЦН-40

Диаметр циклона СЦН-40, м	Коэффициент гидравлического сопротивления циклона ζ ($\zeta_{\text{вх}}$)		Литература
	при работе в сети	при работе на выхлоп	
0,3–1,0	1150 (6,9)	–	[3–5]
0,3–3,0	1100 (6,7)		[5]
0,3	1260 (7,6)		[5, 6]
–	1200 (7)		[7]
0,3	950 (5,8)		[5, 7]
0,4	1300		[5, 8]
0,3	(6,6)		[9]
0,3	1420	–	[10, 11]

Численные исследования гидравлического сопротивления циклона СЦН-40 проводились с помощью инструментария вычислительной гидродинамики, где газовый поток рассчитывался методом Эйлера, в котором параметры потока являются функциями пространственных координат и времени, представляя поля [14, 15].

Движение газового потока в циклоне описывается уравнениями Навье – Стокса. Поскольку числа Маха в циклонах невелики (< 0,2), то были численно решены уравнения Навье – Стокса для несжимаемого изотермического потока:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0,$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j},$$

где u_i – скорость i -го компонента газового потока, м/с; p – статическое давление, Па; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Для моделирования турбулентности была использована осредненная по Рейнольдсу k - ϵ модель. В статистически стационарном потоке каждая переменная может быть записана в виде суммы осредненной величины и флуктуации:

$$u(x_i, t) = \bar{u}(x_i) + u'(x_i, t),$$

где

$$\bar{u}(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(x_i, t) dt,$$

где t – время, с; T – интервал осреднения, который должен быть значительно больше временного масштаба флуктуации.

Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0,$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u'_i u'_j}),$$

где $\overline{u'_i u'_j}$ – тензор напряжений Рейнольдса, представляющий связь между скоростями флуктуаций.

В стандартной k - ϵ модели турбулентности для определения тензора напряжения используется гипотеза Буссинеска:

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k,$$

где ν_t – турбулентная кинематическая вязкость, м²/с; δ_{ij} – коэффициент Кронекера, равный $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$; k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с².

Турбулентные кинематические вязкость и энергия рассчитывались по уравнению

$$\nu_t = C \frac{k^2}{\epsilon}, \quad k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i},$$

где C – модельный коэффициент; ϵ – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, м²/с³.

Величины k и ϵ определялись из дифференциальных уравнений переноса для турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации.

Результаты численного и экспериментального определений гидравлического сопротивления и коэффициента гидравлического сопротивления представлены на рис. 2. Приведенные итоги экспериментальных исследований гидравлического сопротивления представляют осредненные значения по результатам трех измерений. Полученные данные позволили сделать следующие выводы: в исследованном диапазоне условной скорости газа, охватывающем рабочую зону циклона ($w = 1,3$ – $1,9$ м/с), наблюдается близкая к квадратичной зависимость гидравлического сопротивления от условной скорости газа (рис. 2а), в то время как коэффициент гидравлического сопротивления не остается постоянным (рис. 2б), а возрастает с увеличением скорости газа. При этом коэффициент гидравлического сопротивления ощутимо увеличивается (с 1040 до 1110, на $\approx 7\%$) в рабочей области условной скорости газа.

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления высокоэффективного циклона СЦН-40 для рабочего диапазона условных скоростей газа (1,3–1,9 м/с) можно описать следующим эмпирическим уравнением с величиной достоверности аппроксимации 0,885:

$$\zeta = 66,7w + 896.$$

Высокие числа Рейнольдса ($Re > 10000$), рассчитанные по условной скорости газа и внутреннему диаметру циклона, соответствуют турбулентному режиму движения газового потока в циклоне, в то время как зависимость коэффициента гидравлического сопротивления циклона показывает, что режим движения среды не соответствует автомодельному.

Учитывая, что потери давления в циклоне СЦН-40 при работе вблизи верхней границы рабочей зоны превышают 2000 Па, это может оказаться существенным при подборе циклонов, приводя к необходимости внесения уточнений в методику расчета сопротивления для данного типа циклонов.

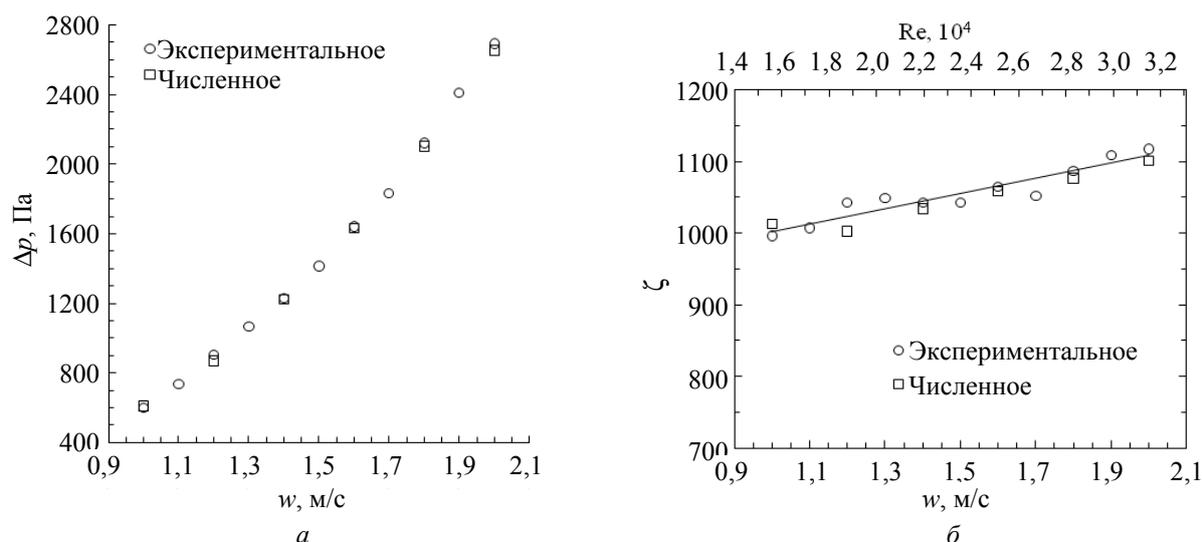


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления (а) и коэффициентов гидравлического сопротивления (б) циклона СЦН-40 от условной скорости газа $w_{ц}$, м/с

Заключение. Проведенные авторами исследования показали, что коэффициент гидравлического сопротивления высокоэффективного циклона СЦН-40 не является постоянной величиной, а возрастает с увеличением условной скорости газа. При этом рост коэффициента гидравлического сопротивления продолжается и в рабочем диапазоне условной скорости газа. Это свидетельствует о том, что циклоны данного

типа используются не в автомоделном режиме и при расчетах гидравлического сопротивления циклона необходимо это учитывать, например, введением поправочного коэффициента.

В дальнейшем планируется проведение исследований влияния диаметра циклона СЦН-40 на коэффициент его гидравлического сопротивления, а также эффективности улавливания пыли в циклоне данного типа.

Литература

1. Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрыбин Г. М. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Химия, 1993. 320 с.
2. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Ярославль: Верх.-Волж. книж. изд-во, 1970. 95 с.
3. Рябчиков С. Я., Карпухович Д. Т. Исследование циклонов для улавливания каталитической пыли крекинг-установок // Промышленная и санитарная очистка газов. 1978. № 4. С. 8–9.
4. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям; под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
5. Лазарев В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители: справ. 2-е изд., перераб. и доп. Н. Новгород: Фирма ОЗОН-НН, 2006. 320 с.
6. Сажин Б. С., Гудим Л. И. Вихревые пылеуловители. М.: Химия, 1995. 144 с.
7. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов; под общ. ред. Л. В. Чекалова. Ярославль: Русь, 2004. 424 с.
8. Кирсанова Н. С. Новые исследования в области центробежной сепарации пыли. М.: ЦИНТИ-химнефтемаш, 1989. 56 с.
9. Карпухович Д. Т. Выбор и эксплуатация циклонов для очистки воздуха и газов от пыли // Химическое и нефтяное машиностроение. 1986. № 2. С. 6–7.
10. Карпухович Д. Т. Влияние относительной высоты цилиндрической части корпуса циклона на его характеристики // Химическое и нефтяное машиностроение. 1986. № 10. С. 17–18.
11. Карпухович Д. Т. О влиянии формы корпуса циклона на эффективности улавливания и гидравлическое сопротивление // Теплоэнергетика. 1987. № 5. С. 63–64.
12. Идельчик И. Е. Гидравлическое сопротивление циклонов, его определение, величина и пути снижения // Механическая очистка промышленных газов / НИИОГАЗ; под ред. Б. Ф. Подошвеникова. М.: Машиностроение, 1974. С. 135–159.
13. Мисюля Д. И. Снижение гидравлического сопротивления циклонов с помощью статических раскручивающих устройств: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2011. 157 с.

14. Misyulya D., Andersson A. G., Lundström T. S. Computational investigation of an industrial cyclone separator with helical-roof inlet. *Chemical engineering and technology*, 2015. Vol. 38. N. 8. P. 1425–1434.
15. Misyulya D., Andersson A. G., Lundström T. S. Effects of the inlet angle on the flow pattern and pressure drop of a cyclone with helical-roof inlet. *Chemical engineering research and design*, 2015. Vol. 102. P. 307–321.

References

1. Kouzov P. A., Mal'gin A. D., Skryabin G. M. *Ochistka gazov i vozdukha ot pyli v khimicheskoy promyshlennosti* [Dedusting of gases and air in chemical production]. Saint-Petersburg, Khimiya Publ., 1993. 320 p.
2. *Tsiklony NIIOGAZ. Rukovodyashchie ukazaniya po proektirovaniyu, izgotovleniyu, montaghu i ekspluatatsii* [Cyclones NIIOGAZ. Guidelines for the design, construction, installation and operation]. Yaroslavl', Verkhne-Volghskoe knigh. izd. Publ., 1970. 95 p.
3. Ryabchikov S. Ya., Karpukhovich D. T. Research of cyclones for collection catalyst dust of cracking units. *Promyshlennaya i sanitarnaya ochistka gazov* [Industrial and Sanitary Gas Cleaning], 1978, no. 4, pp. 8–9 (In Russian).
4. Idel'chik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*; pod redaktsiey M. O. Shteynberga [Handbook of hydraulic resistance; ed. by M. O. Shteynberg]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 672 p.
5. Lazarev V. A. *Tsiklony i vikhrevye pyleuloviteli: spravochnik* [Handbook on cyclones and vortex dust collectors]. Nizhny Novgorod, Firma Ozon-NN Publ., 2006. 320 p.
6. Saghin B. S., Gudim L. I. *Vikhrevye pyleuloviteli* [Vortex dust collectors]. Moscow, Khimiya Publ., 1995. 144 p.
7. *Ekotekhnika. Zashchita atmosfernogo vozdukha ot vybrosov pyli, aerezoley i tumanov*; pod obshchey redaktsiey L. V. Chekalova [Environmental technology. Protection of atmospheric air from dust, aerosols and mists emissions; ed. L. V. Chekalov]. Yaroslavl', Rus' Publ., 2004. 424 p.
8. Kirsanova N. S. *Novye issledovaniya v oblasti tsentrobeghnoy separatsii pyli* [New research in the field of centrifugal dust separation]. Moscow, TSINTIhimneftemash Publ., 1989. 56 p.
9. Karpukhovich D. T. Selection and operation of the cyclone for dedusting of air and gases. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering], 1986, no. 2, pp. 6–7 (In Russian).
10. Karpukhovich D. T. Effect of the relative height of cylindrical part of the cyclone body on its characteristics. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering], 1986, no. 10, pp. 17–18 (In Russian).
11. Karpukhovich D. T. About the effect of the cyclone body shape on collection efficiency and pressure drop. *Teploenergetika* [Heat-and-power engineering], 1987, no. 5, pp. 63–64 (In Russian).
12. Idel'chik I. E. Cyclone pressure drop, its measuring, value and ways to reduce. *Mekhanicheskaya ochistka promyshlennykh gazov* [Mechanical cleaning of industrial gases] (TSINTIhimneftemash, ed. B. Ph. Podoshevnikov). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, pp. 135–159 (In Russian).
13. Misiulia D. I. *Snighenie gidravlicheskogo soprotivleniya tsiklonov s pomoshch'yu staticheskikh raskruchivayushchikh ustroystv. Dis. kand. tekhn. nauk* [Reducing pressure drop by means of static untwisting devices. Thesis cand. of techn. sci.]. Minsk, 2011. 157 p.
14. Misyulya D., Andersson A. G., Lundström T. S. Computational investigation of an industrial cyclone separator with helical-roof inlet. *Chemical engineering and technology*, 2015, vol. 38, no. 8, pp. 1425–1434.
15. Misyulya D., Andersson A. G., Lundström T. S. Effects of the inlet angle on the flow pattern and pressure drop of a cyclone with helical-roof inlet. *Chemical engineering research and design*, 2015, vol. 102, pp. 307–321.

Информация об авторах

Мисюля Дмитрий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dzmitry.misiulia@belstu.by

Кузьмин Владислав Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический

университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kuzminv@belstu.by

Петров Олег Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oleg.petrov@belstu.by

Information about the authors

Misyulya Dmitriy Ivanovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dzmitry.misiulia@belstu.by

Kuz'min Vladislav Vladimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus of Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kuzminv@belstu.by

Petrov Oleg Alekseevich – PhD (Engineering), assistant professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oleg.petrov@belstu.by

Поступила 01.03.2016