



УДК 628.512.621.928

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЦИКЛОННОГО ФИЛЬТРА

NUMERICAL RESEARCHES OF THE ENERGY EFFICIENT CYCLONIC FILTER

Замалиева Альбина Таврисовна

инженер,
ООО «Газпром трансгаз Казань»,
Albina-0587@rambler.ru

Зиганшин Малик Гарифович

доктор технических наук, доцент,
доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции,
Казанский государственный
архитектурно-строительный университет

Аннотация. В результате проведенных исследований на опытном образце циклонного фильтра выявлены степень осаждения частиц при разных физических параметрах. Получены также расчетные выражения для оценки эффективности осаждения частиц в вихревых потоках с использованием уравнений движения Навье-Стокса для потока и первого закона Ньютона для частиц. Определены степени осаждения частиц в циклоне в зависимости от числа Рейнольдса. Проведены расчеты зависимости критических чисел Рейнольдса Re_r , соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона, при скорости потока на входе $u_0 = (1 \dots 7)$ м/с и радиусах кривизны 0,065; 0,085 и 0,1 м. Проведены численные исследования движения потока воздуха на основе опытного образца циклона. Определены степени осаждения частиц в циклоне в зависимости от числа Рейнольдса.

Ключевые слова: циклон, фильтр, сепарация, степень очистки, метод моделирования.

Zamaliyeva Albina Tavrisovna

Engineer,
LLC Gazprom transgaz Kazan,
Albina-0587@rambler.ru

Ziganshin Malik Garifovich

Doctor of Engineering, Associate Professor,
Associate Professor of heatgas supply
and ventilation,
Kazan state architectural
and construction university

Annotation. As a result of the conducted researches on a prototype of the cyclonic filter are revealed extent of sedimentation of particles at different physical parameters. Also settlement expressions for assessment of efficiency of sedimentation of particles in vortex streams with use of the equations of the movement of Navier-Stokes for a stream and the first law of Newton for particles are received. Extents of sedimentation of particles in a cyclone depending on Reynolds number are defined. Calculations of dependence of critical Reynolds numbers of Re_r corresponding to separation of particles from the stream rotating in the ring section of model of a cyclone at a stream speed on u_0 entrance = (1 ... 7) m/s and radiuses of curvature 0,065 are carried out; 0,085 and 0,1 m. Numerical researches of the movement of a stream of air on the basis of a cyclone prototype are conducted. Extents of sedimentation of particles in a cyclone depending on Reynolds number are defined.

Keywords: cyclone, filter, separation, extent of cleaning, modeling method.

Система инженерного анализа должна легко вписываться в процессы конкретной организации, что означает ее способность приспособливаться к специфическим запросам клиента. Понятно, что численное моделирование еще рано рассматривать в качестве альтернативы традиционным методам проектирования, в основе которых лежит реальный, а не виртуальный физический эксперимент. Но также очевидно, что для приближения математической модели явления к реально наблюдаемому в эксперименте необходимо включать в рассмотрение побочные явления и их общее взаимодействие.

Возможности численного моделирования для получения подробной информации о структуре сложных течений являются общепризнанными, а стремительное развитие вычислительной техники превратило его в универсальное средство решения прикладных задач. Благодаря росту производительности компьютерных систем вычислительная гидрогазодинамика становится одной из составляющих процесса проектирования новых технологических аппаратов [1].

Существующие инженерные методики расчета аппаратов по очистке воздуха от твердых частиц до сих пор базируются на полуэмпирических уравнениях подобия и интегральных методах. Разработка и применение вычислительных технологий, реализованных в специализированных вычислительных пакетах программ, позволяют рассчитывать с приемлемой для практики точностью массообменные и гидродинамические характеристики в турбулентных пространственных стационарных отрывных вихревых течениях в многосвязных областях сложной геометрии.

Технологии численного моделирования турбулентных потоков позволяют совершенствовать существующие конструкции циклонных аппаратов и создавать принципиально новые конструкции циклонов, которые будут иметь высокий коэффициент улавливания тонкодисперсных частиц при низком гидравлическом сопротивлении.



Актуальность численного исследования течения многокомпонентной газовой смеси через циклон обусловлена тем, что проведение подобного натурного эксперимента чрезвычайно трудоемко и дорого. Кроме того, при натурном эксперименте не все явления поддаются непосредственному наблюдению. Представлено численное исследование сложного трехмерного течения многокомпонентной газовой смеси через циклон на участке очистки газа в рабочих условиях при средних значениях температуры, давления и расхода газа. Турбулентное течение газа рассчитано с использованием модели нулевых уравнений. В результате численного исследования получено сложное трехмерное распределение давлений и скоростей течения многокомпонентной газовой смеси через циклон пылеуловителя. Расчетное значение гидравлического сопротивления циклона хорошо согласуется с паспортными данными пылеуловителя.

Технические, экономические или технологические разработки, направленные на повышение эффективности циклонов и снижение энергозатрат невозможны без изучения гидромеханических особенностей процесса осаждения частиц и их движения во вращающемся потоке газа. Создание математической модели движения аэрозольной частицы в закрученном потоке позволит оценить эффективность пылеулавливания и выявить влияющие на нее факторы [2].

Для дальнейшего усовершенствования предлагаемой конструкции задача повышения эффективности осаждения частиц в вихревых потоках была решена с применением метода численного моделирования в совокупности с численной математической моделью участка газотранспортной системы [3].

Предлагаемый в данной работе циклонный аппарат совмещает две ступени очистки, тем самым обеспечивает эффективное осаждение мелкодисперсных частиц классов PM₁₀, PM_{2,5} с невысокими энергетическими и материальными затратами [4]. Для определения эффективности отделения взвешенной части потока в данном циклоне-фильтре используется относительное число Рейнольдса Re_r . Это параметр, полученный методами теории подобия, в частности, путем приведения к безразмерному виду системы уравнений, включающих уравнение движения потока и уравнение Ньютона для частицы [5]:

$$Re_r = \frac{U_0 \cdot \rho_p^2 \cdot D_p^4}{c \cdot \rho_g \cdot R_2^3 \cdot \eta}, \tag{1}$$

где U_0 – начальная скорость, м/с, ρ_p – плотность частиц, кг/м³, D_p – диаметр микрочастиц, м, c – коэффициент, зависящий от завихряющегося устройства, ρ_g – плотность газа, кг/м³, R_2 – радиус циклона, м, η – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Соответствие чисел Re_r степеням осаждения в сепараторах циклонного типа было протестировано по аппаратам с достоверно известными характеристиками степени очистки выбросов.

Параметр Re_r выражает соотношение энергий и действий частицы и вращающегося потока. Поэтому в криволинейных потоках численные значения Re_r по уравнению (1) могут использоваться для оценки степени осаждения частиц пыли в сходственных условиях [6].

Результаты расчетов относительного числа Рейнольдса Re_r на основе ЦН-11 в соответствии с рабочими условиями для размеров частиц $D_p = (1...100) \cdot 10^{-6}$ м при скорости потока на входе в циклон $U_0 = 1,0...14,0$ м/с для разных диаметров циклона представлены на рисунке 1.

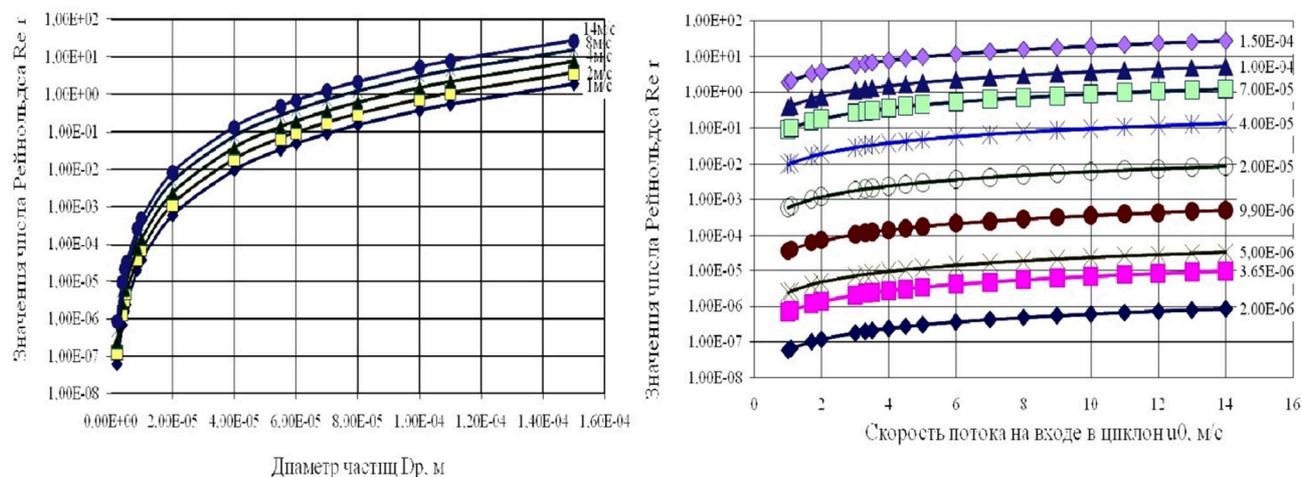


Рисунок 1 – Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для циклона при установке фильтра на $R = 0,0325$ м: а) от размера осаждаемых частиц D_p , м; б) от скорости потока на входе в циклон U_0 , м/с



Результаты вычислений критических чисел Рейнольдса Re_r , соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона при установке фильтра на расстоянии $R = 0,0325$ м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицам диаметром $D_p = 50 \cdot 10^{-6}$ м соответствуют числа $Re_r = 8,27 \cdot 10^{-6}$, при скорости 10 м/с $Re_r = 2,36 \cdot 10^{-5}$, при скорости 14 м/с $Re_r = 3,31 \cdot 10^{-5}$.

Результаты вычислений критических чисел Рейнольдса Re_r , соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона при установке фильтра на расстоянии $R = 0,0325$ м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицам диаметром $D_p = 99 \cdot 10^{-6}$ м соответствуют числа $Re_r = 1,27 \cdot 10^{-4}$, при скорости 10 м/с $Re_r = 3,63 \cdot 10^{-4}$, при скорости 15 м/с $Re_r = 5,08 \cdot 10^{-4}$.

Для сравнения на рисунке 2 и рисунке 3 приведены результаты расчетов значений Рейнольдса Re_r по частицам того же диапазона размеров и скорости при установке фильтра на разных расстояниях $R = 0,04$ м, $R = 0,05$ м.

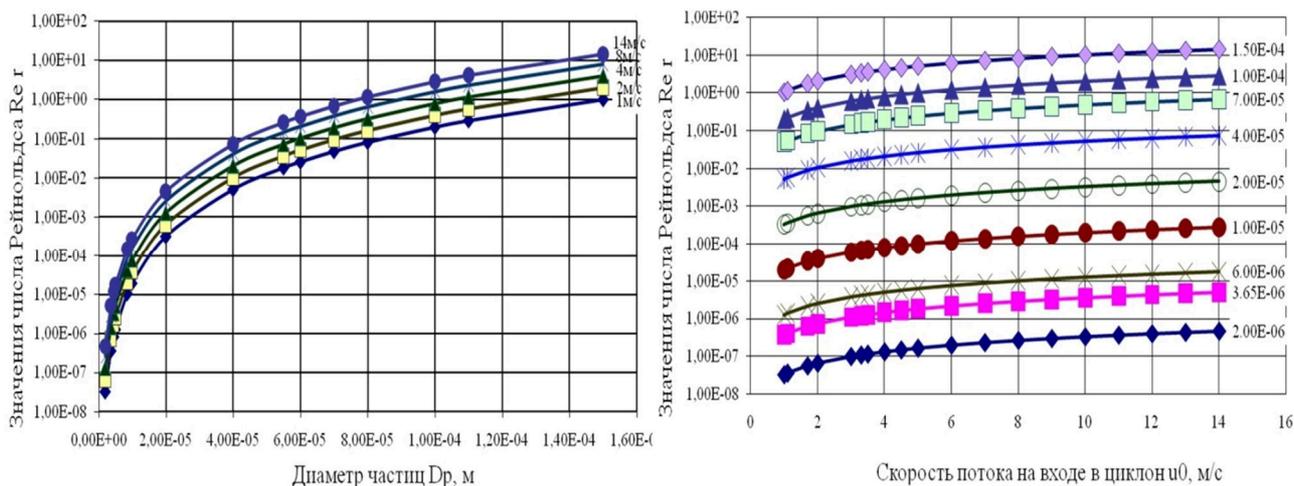


Рисунок 2 – Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для циклона при установке фильтра на $R = 0,04$ м: а) от размера осаждаемых частиц D_p , м; б) от скорости потока на входе в циклон U_0 , м/с

Результаты вычислений критических чисел Рейнольдса Re_r , соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона при установке фильтра на расстоянии $R = 0,04$ м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицам диаметром $D_p = 50 \cdot 10^{-6}$ м соответствуют числа $Re_r = 4,44 \cdot 10^{-6}$, при скорости 10 м/с $Re_r = 1,27 \cdot 10^{-5}$, при скорости 14 м/с $Re_r = 1,77 \cdot 10^{-5}$.

Результаты вычислений критических чисел Рейнольдса Re_r , соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона при установке фильтра на расстоянии $R = 0,04$ м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицам диаметром $D_p = 99 \cdot 10^{-6}$ м соответствуют числа $Re_r = 6,82 \cdot 10^{-5}$, при скорости 10 м/с $Re_r = 1,95 \cdot 10^{-4}$, при скорости 15 м/с $Re_r = 2,73 \cdot 10^{-4}$.

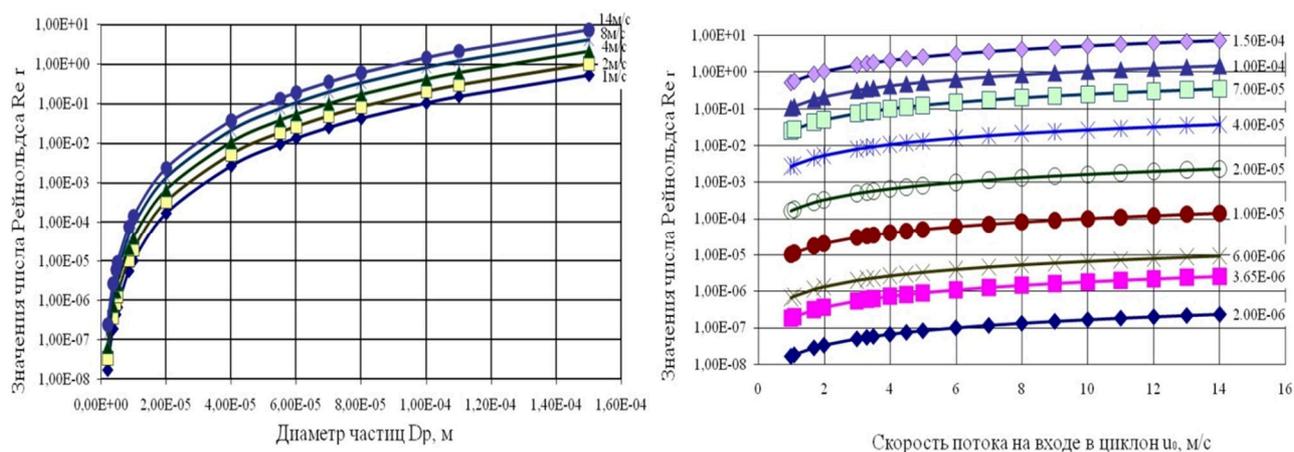


Рисунок 3 – Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для циклона при установке фильтра



на $R = 0,05$ м: а) от размера осаждаемых частиц D_p , м; б) от скорости потока на входе в циклон U_0 , м/с

Результаты вычислений критических чисел Рейнольдса Re_r , соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона при установке фильтра на расстоянии $R = 0,05$ м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицам диаметром $D_p = 50 \cdot 10^{-6}$ м соответствуют числа $Re_r = 2,27 \cdot 10^{-6}$, при скорости 10 м/с $Re_r = 6,49 \cdot 10^{-6}$, при скорости 14 м/с $Re_r = 9,08 \cdot 10^{-6}$.

Результаты вычислений критических чисел Рейнольдса Re_r , соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона при установке фильтра на расстоянии $R = 0,05$ м при скорости потока на входе 3,5 м/с частицам диаметром $D_p = 99 \cdot 10^{-6}$ м соответствуют числа $Re_r = 3,49 \cdot 10^{-5}$, при скорости 10 м/с $Re_r = 9,97 \cdot 10^{-5}$, при скорости 15 м/с $Re_r = 1,40 \cdot 10^{-4}$.

Для верификации результатов выполненных расчетов Re_r , полученных из дифференциальных уравнений, описывающих движение частицы и вращающегося потока для критериальной числовой оценки степени осаждения частиц из криволинейных потоков выполнены оценки степени осаждения частиц в экспериментальном циклоне-фильтре.

В результате проведенных опытов, описанных в [7] выявлено, что на входной фильтрующей вставке улавливается около 68 % пыли, на стенках циклона оседает 18 %, и около 14 % задерживается выходным фильтром из ткани Петрянова. Для данного опыта были выполнены расчеты относительного числа Рейнольдса Re_r . По формуле (1) вначале вычислено значение Re_r для частицы пыли $D_{18} = 31,67$ мкм (это размер частиц, крупнее которого в пыли с представленным дисперсным составом содержится 18 % пылинок). В расчетах для запыленных выбросов были приняты физические свойства воздуха при температуре помещения 22 °С: $\rho_G = 1,197$ кг/м³, $\eta = 18,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с, $V = 2,27$ м/с.

$$Re_r = \frac{U_0 \cdot \rho_p^2 \cdot D_p^4}{\rho_G \cdot R^3 \cdot \eta} = \frac{2,27 \cdot 1410^2 \cdot (31,67 \cdot 10^{-6})^4}{1,197 \cdot 0,05^3 \cdot 18,2 \cdot 10^{-6}} = 16,67 \cdot 10^{-4}.$$

Затем произведен расчет относительного числа Рейнольдса Re_r для минимального размера частиц $D_{99,18}$, осаждаемых практически полностью (на 99,18 %) в опытном циклоне диаметром 100 мм, соотношение размеров элементов в котором выполнено по серийному циклону ЦН-11. Поэтому для опытного циклона приняты следующие характеристики ЦН-11 [8] :

$\lg \sigma_\eta = 0,352$; $D_{50} = 3,65$ мкм – дисперсия и средний диаметр, осаждаемых в циклоне частиц, которые принимают по справочным данным.

Размер частиц $D_{99,18}$ определяли через параметр осаждения x по формуле:

$$x = \frac{\lg(D_{99,18} / D_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_p}}, \quad (2)$$

где σ_η , D_{50} – соответственно дисперсия и диаметр частиц, осажденных в аппарате на 50 %.

Дисперсия пыли по паспорту № 27 [9] : $\sigma = 2,1$.

Для коэффициента очистки $\Phi(x) = 99,18$ % значение параметра осаждения при 99,18 % $x = 2,40$ [8]. Диаметр частиц, осаждаемых с эффективностью 50 % при рабочих условиях определяли по формуле:

$$D_{50} = D_{50r} \sqrt{\left(\frac{D}{D_r}\right) \left(\frac{\rho_{pr}}{\rho_p}\right) \left(\frac{\eta}{\eta_r}\right) \left(\frac{w_r}{w}\right)} = 3,65 \sqrt{\frac{100}{600} \cdot \frac{1930}{1410} \cdot \frac{18,2 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{2,27}} = 1,956 \text{ мкм}, \quad (3)$$

где D_{50r} , D_r , ρ_{pr} , η_r , w_r – соответственно средний диаметр, осаждаемых в циклоне частиц, диаметр циклона, плотность частиц, динамическая вязкость и скорость газового потока, принятые по справочным данным; D_{50} , D , ρ_p , η , w – то же, в рабочих условиях.

Диаметр частиц, улавливаемых на 99,18 %, в соответствии с формулой (2), составляет: $D_{99,18} = 27,374$ мкм. Теперь находим значение Re_r для $D_{99,18} = 27,374$ мкм, обеспечивающего практически полное осаждение загрязнителя из выброса:



$$Re_r = \frac{U_0 \cdot \rho_p^2 \cdot D_p^4}{c \cdot \rho_g \cdot R_2^3 \cdot \eta} = \frac{2,27 \cdot 1410^2 \cdot (27,374 \cdot 10^{-6})^4}{1,197 \cdot 0,05^3 \cdot 18,2 \cdot 10^{-6}} = 9,31 \cdot 10^{-4}$$

Таким образом, значение Re_r для частиц, улавливаемых практически полностью (на 99,18 %) в опытном циклоне, составляет $9,31 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, данный циклон обеспечивает полное осаждение частиц, имеющих инерционную характеристику движения в криволинейном потоке Re_r выше этой величины. Как было показано ранее, для наименьшего размера частиц, осевших при опыте на стенке циклона, $Re_r = 16,67 \cdot 10^{-4}$.

Проведенные исследования показывают, что параметр Re_r позволяет находить численные значения параметров очистки в сепараторах с вращательным движением многофазных потоков расчетным путем. С его помощью могут быть найдены фракционные коэффициенты очистки примеси, если известны параметры потока и конструктивные параметры аппарата, определяющие средний радиус кривизны потока.

Литература:

1. Темникова Е.Ю. Сравнение рабочих характеристик традиционного циклона и имеющего внутренние элементы с помощью программного комплекса σFLOW / Е.Ю. Темникова, М.Ю. Чернецкий // Химия – XXI век: новые технологии, новые продукты: труды XII международной научно-практической конференции, 21–24 апр. 2009 г. – Кемерово, 2009. – С. 131–132.
2. Ватин Н.И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон / Н.И. Ватин, К.И. Стрелец. – СПб. : Химия, 2003. – 65 с.
3. Кантюков Р.Р., Тахавиев М.С., Гилязиев М.Г. и др. Разработка математической модели участка газотранспортной системы // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 2. – С. 3–7.
4. Зиганшин М.Г. Системы очистки выбросов ТЭС. Часть 2. Оценки эффективности, верификация критериев оценки : монография. – Казань : КГЭУ, 2013. – 212 с.
5. Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Повышение энергоэффективности циклонного фильтра для санитарной очистки промышленных выбросов // Материалы международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 132–134.
6. Зиганшин М.Г. Разработка системы комплексных критериальных оценок эффективности и способов усовершенствования пылегазоочистных агрегатов ТЭС : Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.14.14. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2014. – 32 с.
7. Замалиева А.Т., Беляева Г.И. Повышение энергоэффективности циклонных устройств для очистки выбросов в промышленности посредством натуральных и численных исследований / Территория Нефтегаз. – 2017. – № 6. – С. 106–111.
8. Зиганшин М.Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки: учебное пособие / М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, А.М. Зиганшин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург : ЛАНЬ, 2014. – 544 с.
9. Скрыбина Л.Я. Атлас промышленных пылей. Часть I. – М. : ВДНТИ-Химнефтемаш, 1980. – 46 с.

References:

1. Temnikova E.Yu. Comparison of performance data of a traditional cyclone and having internal elements by means of a program complex σFLOW / E.Yu. Temnikova, M.Yu. Chernetsky // Chemistry – the 21st century: new technologies, new products: works XII of the international scientific and practical conference, 21–24 Apr. 2009 – Kemerovo, 2009. – P. 131–132.
2. Vatin N.I. Purification of air by means of cyclone / N.I. Vatin, K.I. Strelets. – SPb. : Chemistry, 2003. – 65 p.
3. Kanyukov R.R., Takhaviyev M.S., Gilyazyev M.G., etc. Development of mathematical model of the site of the gas transmission system // Transport and storage of nefteprokdukt and hydrocarbonic raw materials. – 2015. – № 2. – P. 3–7.
4. Ziganshin M.G. Systems of cleaning of emissions of thermal power plant. Part 2. Efficiency estimates, verification of evaluation criteria : monograph. – Kazan : KGEU, 2013. – 212 p.
5. Zamaliyeva A.T., Ziganshin M.G. Increase in energy efficiency of the cyclonic filter for sanitary cleaning of industrial emissions // Materials of the international scientific and practical conference. – 2016. – P. 132–134.
6. Ziganshin M.G. Development of the system of complex criteria estimates of efficiency and ways of improvement of pylegazoochistny units of thermal power plant : Avtoref. yew. ... Drs. tech. sciences: 05.14.14. – Kazan : Kazan state power university, 2014. – 32 p.
7. Zamaliyeva A.T., Belyaeva G.I. Increase in energy efficiency of cyclonic devices for cleaning of emissions in the industries by means of natural and numerical researches / Territory Neftegaz. – 2017. – № 6. – P. 106–111.
8. Ziganshin M.G. Design of devices of a pylegazoochistka : manual / M.G. Ziganshin, A.A. Kolesnik, A.M. Ziganshin. – Prod. the 2nd, reslave. and additional – St. Petersburg : Lan, 2014. – 544 p.
9. Scriabina L.Ya. Atlas industrial pyly. Part I. – M. : VDNTI-Himneftemash, 1980. – 46 p.