

УДК 628.512.621.928

А.Т. Замалиева¹, e-mail: Albina-0587@rambler.ru; Г.И. Беляева², e-mail: gulnazka16@mail.ru¹ ООО «Газпром трансгаз Казань» (Арск, Республика Татарстан, Россия).² ООО «Газпром трансгаз Казань» (Казань, Республика Татарстан, Россия).

Повышение энергоэффективности циклонных устройств для очистки выбросов в промышленности посредством натуральных и численных исследований

Целью работы является разработка циклонного фильтрующего аппарата, применяемого на действующих очистных сооружениях. Изготовлен и испытан опытный образец циклонного фильтрующего аппарата. 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_c , соответствующих сепарации частиц из потока, вращающегося в кольцевом сечении модели циклона, при скорости потока на входе $u_0 = (1...7)$ 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. Выявлены изменения тангенциальных составляющих скоростей и статического давления в нескольких поперечных сечениях циклона посредством методов вычислительной гидродинамики. Данная разработка позволит достичь увеличения пропускной способности очистных аппаратов в 4 раза при повышении качества очистки газа, которое выражается в уменьшении размера частиц, улавливаемых на 50 % (диаметра отсекаания), со средних для циклонов значений 5–10 мкм до 0,4 мкм. Указанное улучшение качества очистки не требует дополнительных затрат энергии, что является одним из преимуществ аппарата перед аналогами.

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

.....

А.Т. Замалиева¹, e-mail: Albina-0587@rambler.ru; Г.И. Беляева², e-mail: gulnazka16@mail.ru

¹ Gazprom transgaz Kazan LLC (Arsk, Republic of Tatarstan, Russia).² Gazprom transgaz Kazan LLC (Kazan, Republic of Tatarstan, Russia).

The Improving of the Energy Efficiency of Cyclonic Devices for Emissions Cleaning in the Industry by Natural and Numerical Explorations

The main goal of the work is the development of the cyclone filtering devices, which are applied in existing cleaning facilities. The prototype of the cyclone filter apparatus was created and tested. In the result of the research the level of particles deposition with different physical parameters was identified with the prototype of the cyclone filter apparatus. The theoretical expressions for the estimation of the efficiency of the particle deposition in a vortex flow were obtained using the Navier – Stokes equations of motion for flow and the first Newton's law for particles. Levels of particles deposition in the cyclone depending on the Reynolds number were determined. The calculations of the dependence of critical Reynolds numbers Re_c were performed. These numbers are relevant to the separation of the particles from the flow, rotating in the annular section of the cyclone model with a flow rate at the entrance $u_0 = (1...7)$ m/s and radii of curvature 0.065; 0.085 and 0.1m. The numerical studies of the air flow movement based on the prototype of the cyclone were performed too. Levels of particles deposition in the cyclone depending on the Reynolds number were determined. The changes of tangential velocity and the static pressure at several cross-sections of the cyclone were detected using the methods of computational hydrodynamics. This development will allow to increase the capacity of cleaning facilities by four times with the improvement of the quality of gas purification, which is expressed in the reducing of the size of

the captured particles at 50 % (the cut-off diameter) from the average values for the cyclones of 5–10 μm up to 0.4 μm. The noticed improvement in the quality of cleaning does not require the additional energy consumption that is one of the advantages of the device over analogues.

Keywords: a cyclone, a filter, a separation, a degree of purification, a method of modeling.

Узел очистки газа на компрессорных станциях является ключевым элементом системы защиты окружающей среды и служит для предотвращения попадания механических примесей и жидкостей в технологические трубопроводы, оборудование, средства контроля и автоматики станции и потребителей [1]. Для очистки газа должны применяться пылеулавливающие устройства, обеспечивающие подготовку газа для стабильной работы оборудования и являющиеся неотъемлемой частью действующей автоматизированной системы мониторинга состояния окружающей среды [2]. Механические примеси приводят к износу труб, запорной и регулирующей арматуры. Это в целом снижает надежность системы газоснабжения. Одним из предлагаемых нами технических решений является циклонный аппарат, совмещающий две ступени очистки для эффективного осаждения мелкодисперсных частиц классов PM10, PM2.5 с минимальными энергетическими и материальными затратами. Технический результат достигается за счет конструктивных особенностей аппарата. Циклон-фильтр содержит цилиндрический корпус с коническим днищем, штуцер тангенциального ввода запыленного газового потока, выхлопную трубу, выполняющую функции штуцера для отвода очищенного газа, по диаметру которой устанавливается фильтровальный материал (например, лавсан). Кроме того, для регенерации фильтровального материала, например, путем периодической обратной продувки, снаружи цилиндрической части корпуса установлены продувочные штуцеры. Нами были проведены серии опытов в четыре этапа:

- с минимальной массой пыли при минимальной скорости;
- с максимальной массой пыли при минимальной скорости;
- с минимальной массой пыли при максимальной скорости;
- с максимальной массой пыли при максимальной скорости.

Запыленные пробы фильтровального материала исследовались на микроскопе МИН-8 с 25-кратным увеличением, при котором отчетливо видны крупинки пылинок, осевших на тканевом фильтре (рис. 1). Запыление оставляет на поверхности выходного фильтра спиральный след, что свидетельствует об интенсивной закрутке потока в выхлопной трубе, имеющей место при работе обычных циклонов без фильтрующих вставок, а также о наличии низкочастотных прецессий ядра закрученного потока, характерных для циклонов возвратно-поточного типа. В результате проведенных экспериментов выявлено, что на входной фильтрующей вставке улавливается около 75 % пыли, на стенках оседает 20 % и около 5 % задерживается выходным фильтром из ткани Петрянова. Можно сделать вывод о целесообразности конструктивного дополнения в виде фильтрующей ткани, на которой происходило инерционное осаждение пыли. При этом выходной фильтр не мешает нормальной работе возвратной выхлопной трубы. Для дальнейшего совершенствования 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].

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 [4]. 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 в каналах сложной геометрии. Создание математической модели движения аэрозольной частицы в закрученном потоке позволит оценить эффективность пылеулавливания и выявить влияющие на нее факторы [3].

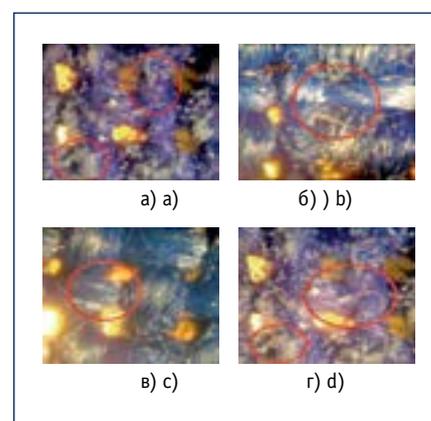


Рис. 1. Образец драпировочной ткани в процессе испытаний в четыре этапа: а) опыт № 1; б) опыт № 2; в) опыт № 3; г) опыт № 4

Fig. 1. A sample of the draping fabric during the tests in four stages: а) the test No. 1; б) the test No. 2; в) the test No. 3; г) the test No. 4

Ссылка для цитирования (for citation):

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. 106–110.
 Zamaliyeva A.T., Belyayeva G.I. The Improving of the Energy Efficiency of Cyclonic Devices for Emissions Cleaning in the Industry by Natural and Numerical Explorations. Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory, 2017, No. 6, P. 106–110. (In Russian)

Соответствие чисел Re_r степеням осаждения в сепараторах циклонного типа было протестировано применительно к аппаратам с достоверно известными характеристиками степени очистки выбросов [5]. Так, для одного из наиболее распространенных типов циклонов ЦН-11, с табличными значениями всех конструктивных параметров, известны следующие характеристики степени осаждения частиц: $D_{50} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ м, логарифм дисперсии размеров улавливаемых частиц $\lg \sigma_1 = 0,352$. При плотности выбросов $\rho_G = 1,293$ кг/м³, дисперсии размеров взвешенных частиц $\sigma_p = 2,2$ (пыль обжига колчедана), для степени очистки 99 % параметр осаждения $\chi = 2,4$. Размер D_{99} частиц, улавливаемых на 99 %, полученный на основе соотношения для определения параметра осаждения, составляет $70 \cdot 10^{-6}$ м.

Значения числа Рейнольдса Re_r для частиц с размером, соответствующим 50%-й (D_{50} , м) и 99%-й (D_{99} , м) очистке в циклонах ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24, приведены на графике (рис. 2).

Результаты вычислений 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 $d_n = 0,065$ м (диаметр горловины циклона), $d_c = 0,1$ м (диаметр корпуса циклона), $d_{cp} = 0,0825$ м (средний диаметр циклона), приведены в табл. 1 [6].

Результаты расчетов чисел Рейнольдса Re_r для размеров частиц, осаждающихся в циклоне на 50 и 99 % ($D_{50} \cdot 10^{-6}$ м и $D_{99} \cdot 10^{-6}$ м), представлены на рис. 3 и 4. Расчеты показали, что степеням осаждения частиц в циклоне соответствуют строго определенные значения чисел Re_r . Так, степени осаждения 99 % коррелирует число $Re_r \sim 4 \cdot 10^{-4}$, а степени осаждения 50 % $\sim 7 \cdot 10^{-9}$. В целом 10%-му увеличению степени очистки в циклоне соответствует рост численного значения Re_r на $\sim 3,3 \cdot 10^{-3}$. Проведенные исследования показывают, что параметр Re_r позволяет расчетным путем находить численные значения параметров очистки в сепараторах с вращательным движением многофазных потоков. С его помощью могут быть найдены фракционные коэффициен-

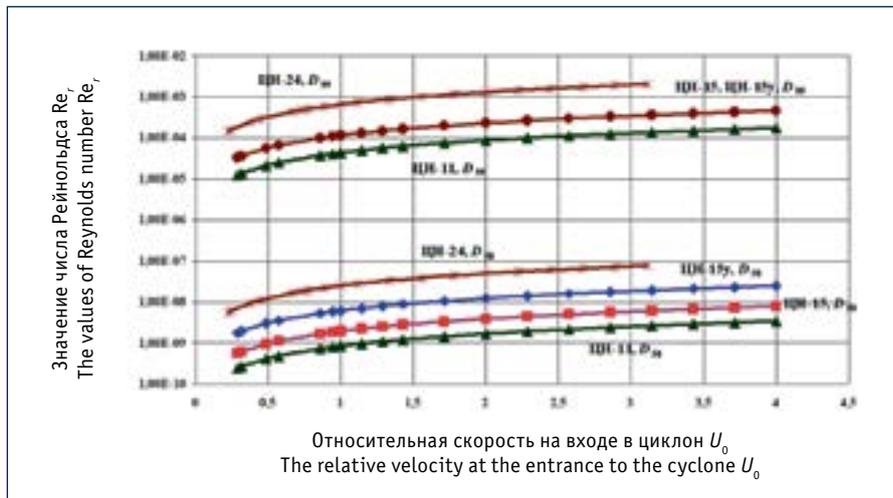


Рис. 2. Значения числа Рейнольдса Re_r для частиц с размером, соответствующим 50%-й (D_{50} , м) и 99%-й (D_{99} , м) очистке в циклонах ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24

Fig. 2. The values of Reynolds number Re_r for the particles of the size corresponding to 50 % (D_{50} , m) and 99 % (D_{99} , m) cleaning in cyclones ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24

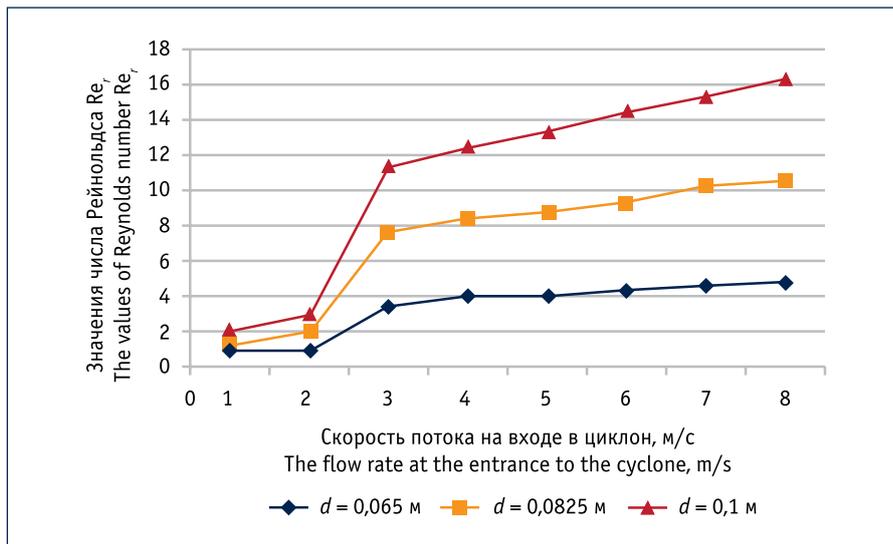


Рис. 3. Значения числа Рейнольдса Re_r для частиц размером, соответствующим 50%-й (D_{50} , мкм) очистке в циклоне

Fig. 3. The values of Reynolds number Re_r for the particles of the size corresponding to 50 % (D_{50} , m) cleaning in the cyclone

ты очистки примеси, если известны параметры потока и конструктивные параметры аппарата, определяющие средний радиус кривизны потока.

Аналитическое решение уравнений Навье – Стокса в рамках поставленной технической задачи описания движения жидкости (газа) в циклоне при осредненных числах Рейнольдса и отсутствии какой-либо симметрии движения вследствие спирального вращения потока является сложным и неудобным при обработке результатов [7].

К тому же получаемый результат (решение в одной точке) не позволяет работать с визуализацией.

На основе многочисленных вычислений проведен анализ используемых методов на основе модели циклона-фильтра. Расчеты проводились с использованием пакета программного обеспечения Fluent (численного моделирования динамики газового потока CFD), использующего метод конечных объемов. Движение жидкости моделируется с использованием уравнений Навье –

Стокса и осредненных значений числа Рейнольдса. Для обеспечения замкнутости системы в уравнениях переноса и потери (диссипации) кинетической энергии используется модель вязкости Спаларта – Аллмараса [8].

Посредством методов вычислительной гидродинамики выявлены изменения тангенциальных составляющих скоростей и статического давления в нескольких поперечных сечениях циклона (рис. 5).

Полученные результаты численного моделирования подтверждены эмпирическими результатами натурных испытаний, сопоставимы с результатами, полученными сторонними исследователями, и не противоречат основным подходам аналитического решения уравнений Навье – Стокса и теплопроводности для граничных условий 1–3-го родов [9–10].

Во всех сечениях в периферийной части потока наблюдается увеличение тангенциальной составляющей скорости по радиусу по мере удаления от стенок циклона. Давление падает по радиусу к центру циклона, достигая минимума на оси вращения. Можно с достаточной для практических целей точностью определить разрежение, которое устанавливается в пылесборном бункере циклона.

На периферии циклона профили тангенциальной скорости накладываются, а при приближении к выходному отверстию расходятся.

С увеличением крутки положение максимума тангенциальной скорости смещается на периферию, а его относительная величина снижается [11]. Это обстоятельство объясняется затруднением проникновения газа, который переносит момент количества движения, из периферии в центральную область. С увеличением крутки величина относительного разрежения (отношение разрежения в центре камеры к избыточному давлению газа на входе в камеру) снижается, а относительный радиус зоны разрежения увеличивается [12]. Отметим, что снижение максимума относительной тангенциальной скорости и относительного разрежения в центре с увеличением крутки сопровождается увеличением абсолютных значений этих

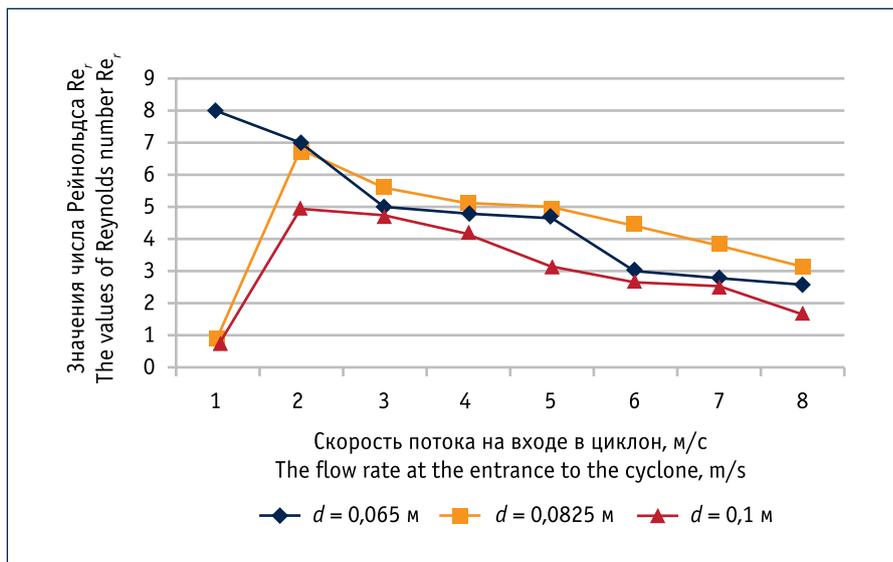


Рис. 4. Значения числа Рейнольдса Re , для частиц размером, соответствующим 99%-й (D_{99} , мкм) очистке в циклоне

Fig. 4. The values of Reynolds number Re , for the particles of the size corresponding to 99 % (D_{99} , m) cleaning in the cyclone

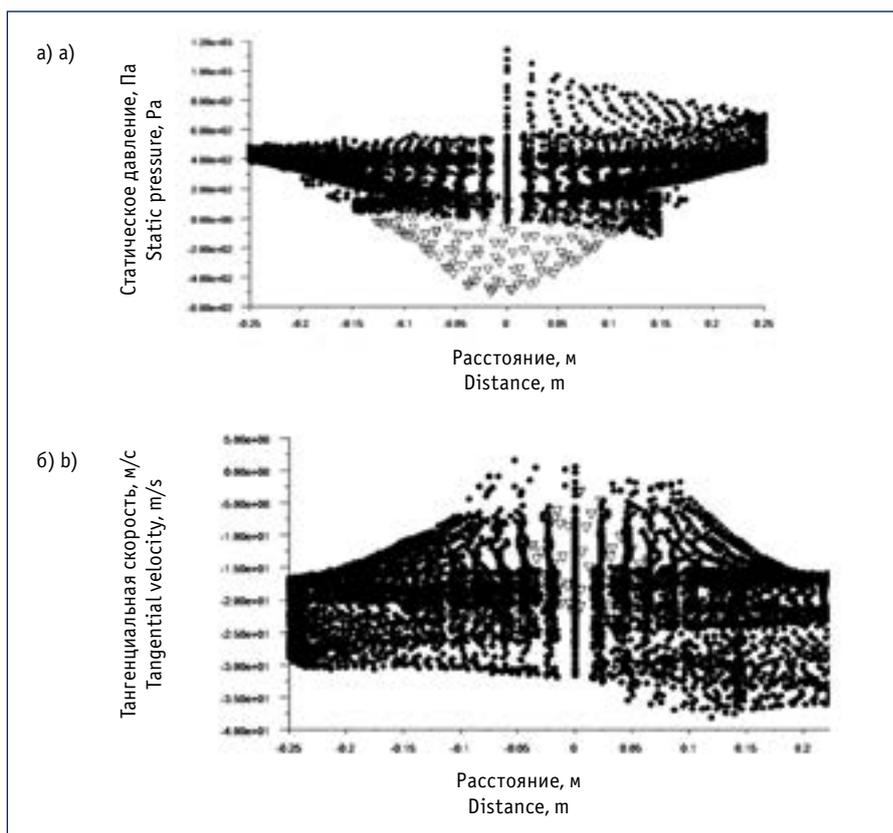


Рис. 5. Изменение статического давления (а) и тангенциальной скорости (б) внутри циклона, полученное с помощью методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics), где ∇ – физический параметр во входной части циклона; \bullet – физический параметр в центре циклона

Fig. 5. The change of the static pressure (a) and the tangential velocity (b) inside the cyclone, obtained by the methods of computational fluid dynamics, where ∇ – physical parameter in the entrance part of the cyclone; \bullet – physical parameter in the center of the cyclone

характеристик при постоянном расходе [13].

Таким образом, техническим результатом является повышение степени улавливания частиц тонкой дисперсной фазы за счет специальной вставки – тканевого фильтра. Разработка позво-

лит достичь увеличения пропускной способности очистных аппаратов в 4 раза при повышении качества очистки газа, которое выражается в уменьшении размера частиц, улавливаемых на 50 % (диаметра отсекаания), со средних для циклонов значений 5–10 мкм до 0,4 мкм.

Указанное улучшение качества очистки не требует дополнительных затрат энергии, что является одним из преимуществ по сравнению с аналогами: для уменьшения диаметра отсекаания на 0,1 мкм после 1 мкм требуется увеличение затрат энергии не менее чем на 15 %.

Литература:

1. Кантюков Р.Р., Сорвачев А.В. Своевременное обновление газотранспортного оборудования – основа стабильной работы компрессорных станций // Газовая промышленность. 2015. № 9 (727). С. 38–39.
2. Кантюков Р.А., Гимранов Р.К., Рыженков И.В. и др. Автоматизированная система мониторинга состояния окружающей среды // Химическая промышленность сегодня. 2015. № 3. С. 25–32.
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. Темникова Е.Ю., Чернецкий М.Ю. Сравнение рабочих характеристик традиционного циклона и имеющего внутренние элементы с помощью программного комплекса σFLOW // Химия – XXI век: новые технологии, новые продукты: Труды XII Междунар. науч.-практ. конф., 21–24 апр. 2009 г. С. 131–132.
5. Ватин Н.И., Стрелец Н.И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон. СПб.: Химия, 2003. 65 с.
6. Зиганшин А.М., Зиганшин М.Г., Колесник А.А.. Проектирование аппаратов пылегазоочистки: 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Лань, 2014. 244 с.
7. Кантюков Р.Р., Тахавиев М.С., Лебедев Р.В. и др. Аналитическое исследование на наличие бифуркационных явлений при течении нелинейно-вязких жидкостей в каналах сложной геометрии // Вестник Казанского технологич. ун-та. 2015. Т. 18. № 3. С. 222–225.
8. Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Численные и натурные исследования аэродинамических свойств и эффективности использования циклонного фильтра для санитарной очистки выбросов в промышленности // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: Сб. науч. трудов по материалам Междунар. науч.-практ. конф.: В 7 ч. М.: Ар-Консалт, 2014. С. 114–115.
9. Кантюков Р.Р., Тахавиев М.С., Лившиц С.А. и др. Решение стационарного уравнения теплопроводности с химическим и диссипативным источником тепла в бесконечной круглой трубе для ньютоновской жидкости // Вестник Казанского технологич. ун-та. 2015. Т. 18. № 11. С. 200–205.
10. Кантюков Р.Р., Тахавиев М.С., Лившиц С.А. и др. Решение стационарного уравнения теплопроводности с химическим источником тепла при граничных тепловых условиях 3-го рода в бесконечной круглой трубе // Вестник Казанского технологич. ун-та. 2015. Т. 18. № 9. С. 222–225.
11. Замалиева А.Т., Беляева Г.И. Изменение аэродинамических свойств и эффективности в циклонных аппаратах посредством численных и натуральных исследований // Вестник Казанского технологич. ун-та. 2015. Т. 18. № 4. С. 134.
12. Беляева Г.И., Зиганшин М.Г. Повышение энергоэффективности применения батарейного циклона для очистки природного газа // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: Мат-лы III Междунар. (IX Всероссийской) конф. Чебоксары: Изд-во ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2016. С. 459–463.
13. Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Повышение энергоэффективности циклонного фильтра для санитарной очистки промышленных выбросов // Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении: Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. / Под редакцией Ф.К. Абдразакова. Саратов: Изд-во ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2016. С. 37–39.

References:

1. Kanyukov R.R., Sorvachev A.V. The Actual Updating of the Gas Transmission Equipment is the Basis of the Stable Operation of Compressor Stations. *Gazovaya promyshlennost' = Gas industry*, 2015, No. 9 (727), P. 38–39. (In Russian)
2. Kanyukov R.A., Gimranov R.K., Ryzhenkov I.V., et al. The Automated System of Environmental Monitoring. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya = Chemical industry today*, 2015, No. 3, P. 25–32. (In Russian)
3. Kanyukov R.R., Takhaviev M.S., Gilyaziev M.G., et al. The Development of a Mathematical Model of the Part of the Gas Transportation System. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodородного syr'ya = The transport and the storage of petroleum products and hydrocarbons*, 2015, No. 2, P. 3–7. (In Russian)
4. Temnikova E.Y., Chernetsky M.Y. The Comparison of the Performance of the Traditional Cyclone with Internal Elements Using the Software Complex σFLOW. In: *Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference «Chemistry – XXI century: new technologies, new products»*, 21–24 April 2009, P. 131–132. (In Russian)
5. Vatin N.I., Strelets N.I. *The Air Cleaning Using the Devices of the Type*. Saint Petersburg, Khimiya, 2003, 65 pp. (In Russian)
6. Ziganshin A.M., Ziganshin M.G., Kolesnik A.A. *The Designing of the Apparatus for Dust and gas Cleaning*. 2nd ed. redesigned and supplemented. Saint Petersburg, Lan', 2014, 244 pp. (In Russian)
7. Kanyukov R.R., Takhaviev M.S., Lebedev R.V., et al. The Analytical Research for the Presence of Bifurcation Effects in the Flow of Nonlinear Viscous Fluids in Channels of Complex Geometry. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = The Herald of Kazan Technological University*, 2015, Vol. 18, No. 3, P. 222–225. (In Russian)
8. Zamaliyeva A.T., Ziganshin M.G. Numerical and Natural Studies of Aerodynamic Properties and the Efficiency of Using the Cyclone Filter for Sanitary Cleaning of the Emissions in the Industry. *Collection of scientific works based on the proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Science, Education, Society: Trends and Prospects»*: In 7 parts. Moscow, Ar-consult LLC, 2014, P. 114–115. (In Russian)
9. Kanyukov R.R., Takhaviev M.S., Livshits S.A., et al. The Solution of the Stationary Equation of Heat Conductivity with the Chemical and Dissipative Heat Source in an Infinite Circular Pipe for a Newtonian Fluid. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = The Herald of Kazan Technological University*, 2015, Vol. 18, No. 11, P. 200–205. (In Russian)
10. Kanyukov R.R., Takhaviev M.S., Livshits S.A., et al. The Solution of the Stationary Equation of Heat Conductivity with the Chemical Source with the Boundary Thermal Conditions of the 3rd Kind in an Infinite Circular Pipe. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = The Herald of Kazan Technological University*, 2015, Vol. 18, No. 9, P. 222–225. (In Russian)
11. Zamaliyeva A.T., Belyayeva G.I. The Change of the Aerodynamic Properties and the Efficiency of Cyclone Devices Through Numerical and Natural Research. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = The Herald of Kazan Technological University*, 2015, Vol. 18, No. 4, P. 134. (In Russian)
12. Belyayeva G.I., Ziganshin M.G. The Increasing of the Energy Efficiency of a Battery Cyclone for Cleaning of Natural Gas. In: *Proc. of the III International (IX All-Russian) Conference «New in Architecture, Design of Building Structures and Reconstruction»*. Cheboksary, Pub. house of the Ulyanov Chuvash State University, 2016, P. 459–463. (In Russian)
13. Zamaliyeva A.T., Ziganshin M.G. The Improving of the Energy Efficiency of the Cyclone Filter for Sanitary Cleaning of Industrial Emissions. In: *Proc. of The International Scientific and Practical Conference «Research in the Construction, the Heat and Energy Supply»*. Ed. by F.K. Abdrazakov. Saratov, Publ. house of the Saratov State Vavilov Agrarian University, 2016, P. 37–39. (In Russian)