

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОТОКА ГАЗА В БАТАРЕЙНЫХ ЦИКЛОНАХ

УДК 621.928.94

Г.И. Беляева, ООО «Газпром трансгаз Казань» (Казань, РФ),
gulnazka16@mail.ru

А.Т. Замалиева, ООО «Газпром трансгаз Казань», ЭПУ «Сабыгаз»
(Арск, Республика Татарстан, РФ), Albina-0587@rambler.ru

Целью работы является создание циклонного фильтрующего аппарата для действующих очистных сооружений. В результате проведенных исследований на опытном образце циклонного фильтра определена степень осаждения частиц при разных физических параметрах. Получены расчетные выражения для оценки эффективности осаждения частиц в вихревых потоках с использованием уравнений движения Навье – Стокса для потока и первого закона Ньютона для частиц. Результаты, представленные в статье, позволяют определить наиболее эффективное расположение входов полуулиточных патрубков циклонных элементов в батарейном циклоне и учитывать гидравлическое сопротивление аппарата. Определены степени осаждения частиц в циклоне в зависимости от числа Рейнольдса. Методы моделирования вращающихся двухфазных потоков в циклонах показывают, что для прикладных задач основной является модель RANS (RANS, Reynolds-Averaged Navier – Stokes equation), основанная на рейнольдсовом осреднении параметров турбулентности и уравнениях Навье – Стокса. Замыкание уравнений разрешается на базе простых статистических моделей турбулентности.

Выявлены изменения тангенциальных составляющих скоростей и статического давления в нескольких поперечных сечениях циклона посредством методов вычислительной гидродинамики. С применением результатов, полученных в ходе исследования, сконструирован батарейный циклон, элементами которого являются циклон-фильтры. Методами вычислительной гидродинамики построена 2D-модель серийного батарейного циклона ЦБ-16, состоящего из 16 циклонных элементов. Рассмотрены две модели расположения циклонных элементов. Все данные численного моделирования подтверждены эмпирическими результатами натуральных испытаний, сопоставимы с ними и не противоречат основным подходам аналитического решения уравнений Навье – Стокса и теплопроводности для граничных условий 1–3-го родов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЦИКЛОН, ФИЛЬТР, СЕПАРАЦИЯ, СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Оптимальный режим эксплуатации магистральных трубопроводов в значительной степени определяется работой компрессорных станций (КС), устанавливаемых по трассе газопровода [1]. В связи с непрерывным ростом стоимости энергоресурсов в стране, увеличением себестоимости транспорта газа, невозобновляемостью его природных ресурсов важнейшими направлениями многих исследований в области трубопроводного транспорта газа следует считать разработки, направленные на снижение энергозатрат. Решение этой важнейшей для отрасли задачи возможно и за счет повы-

шения энергоэффективности эксплуатации установленных на КС вспомогательных устройств, в том числе аппаратов для очистки газа. Узел очистки газа является ключевым элементом системы защиты окружающей среды, а также неотъемлемой частью действующей автоматизированной системы мониторинга состояния [2]. Результаты данного исследования направлены на увеличение эффективности и качественное улучшение характеристик газоочистного оборудования.

Одними из наиболее распространенных устройств пылеочистой техники считаются

батарейные циклоны. Их широкое распространение обусловлено простотой устройства, надежностью в эксплуатации и небольшими капитальными и эксплуатационными затратами. Однако мультициклоны эффективно осаждают взвешенные частицы только среднего (от 10 мкм) и крупного размера, ввиду чего используются для первичной обработки выбросов. Для окончательной обработки за ними необходимо устанавливать фильтрующие аппараты тонкой очистки – электрические или пористые фильтры. В статье рассматривается возможность

Belyaeva G.I., Gazprom transgaz Kazan LLC (Kazan, Republic of Tatarstan, RF), gulnazka16@mail.ru

Zamaliyeva A.T., Gazprom transgaz Kazan LLC, Operation Production Office «Sabygaz» (Arsk, Republic of Tatarstan, RF), Albina-0587@rambler.ru

Study of changes of aerodynamic properties of gas flow in battery cyclones

The aim of the work is to create a cyclonic filter apparatus for operating the treatment facilities. On the prototype of the cyclone filter, the studies determined the degree of particle sedimentation at different physical parameters. Calculation formulas are obtained to estimate the efficiency of particle sedimentation in vortex flows using the Navier – Stokes equations for the vortex and Newton's first law for particles. The results presented in the article make it possible to determine the most effective arrangement of the entrances of the semi-detached nozzles of the cyclone elements in the battery cyclone and to take into account the hydraulic resistance of the apparatus. The degrees of sedimentation of particles in the cyclone are determined depending on the Reynolds number. The methods for simulating of the rotating two-phase flows in the cyclones show that the main application for applied problems is the RANS (RANS, Reynolds-Averaged Navier – Stokes equation) model, based on the Reynolds averaging of the turbulence parameters and the Navier – Stokes equations. The closing of the equations is solved on the basis of simple statistical turbulence models.

The changes in the tangential velocity components and static pressure in several cross sections of the cyclone are revealed by means of computational hydrodynamics methods. Using the results obtained during the study, the battery cyclone is composed, its elements are cyclone filters. The 2D model of the serial battery cyclone CB-16 (ЦБ-16) consisting of 16 cyclone elements was constructed by methods of computational hydrodynamics. Two models of the arrangement of cyclonic elements are considered. All the numerical modeling data are confirmed by empirical results of field tests, comparable to them and do not contradict the basic approaches of the analytical solution of the Navier – Stokes equations and the thermal conductivity for boundary conditions of the 1st, 2nd and 3rd kinds.

KEY WORDS: CYCLONE, FILTER, SEPARATION, SEPARATION EFFICIENCY, NUMERICAL SIMULATION.

создания энергоэффективного устройства, совмещающего обе ступени очистки.

Результаты натурных испытаний опытного образца показали, что оснащение циклонного устройства фильтровальными элементами по предложенной схеме не нарушает характера движения дисперсного потока. Поэтому можно позволить оценить эффективность пылеулавливания и выявить влияющие на нее факторы на математической модели движения аэрозольной частицы в закрученном потоке. При условии создания модели методами вычислительной гидродинамики (CFD) упрощается дальнейшая оптимизация очистного устройства. Очевидно, что результаты численных исследований должны верифицироваться на натурных моделях по отработанной методике стендовых испытаний.

Анализ используемых в последнее время методов моделирования вращающихся двухфазных потоков в циклонах показыва-

ет, что для прикладных задач по-прежнему остаются незаменимыми модели RANS (RANS, Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation), основанные на рейнольдсовом осреднении параметров турбулентности и уравнениях Навье – Стокса. Задача замыкания уравнений разрешается на базе простых статистических моделей турбулентности, как правило, двухпараметрических (например, $k-\epsilon$). При этом их основное достоинство заключается в доступности вычислительного ресурса для задач, близких к реальным условиям. Вместе с тем есть ряд проблем, снижающих уровень корректности и ценность получаемых результатов. В частности, эти модели недостаточно приспособлены к расчетам переноса энергии с вихрями по криволинейной траектории. Считается, что метод моделирования крупных вихрей (LES, Large-Eddy Simulation) будет сопровождаться меньшими ошибками, поскольку непосредственно рассматривают-

ся крупномасштабные структуры турбулентности, которые, как известно, сопоставимы по порядку с размером ограничивающей поверхности. Для конструкции циклона и вращающегося в нем двухфазного потока этот размер служит одним из основных геометрических параметров, влияющих на сепарацию взвеси. В этом отношении использование модели LES для циклона предпочтительнее, чем модели RANS с базовыми уравнениями Навье – Стокса, описывающими линейное движение среды. В то же время для подробного разрешения вихрей широкого спектра частот необходимы значительные затраты машинного ресурса, ввиду чего методы LES при практическом применении требуют существенного упрощения исходного реального процесса. Это привело к развитию гибридных подходов, таких как моделирование отдельного вихря (DES, Detached-Eddy Simulation), которое использует стандартное пристенное моделирование RANS

в сочетании с LES для всех отдельных вихрей, с ограничением линейного масштаба в соответствии с локальным интервалом расчетной сетки. В соответствии с приведенными скоростями потока в возвратно-поточном циклоне, рассчитанными по методам DES и RANS, осевые компоненты скорости по DES практически совпадают с экспериментальными, а тангенциальные отличаются на постоянную величину. При этом результаты расчетов по RANS качественно отличаются от экспериментальных.

Необходимо также учесть, что характерный радиус кривизны потока в циклоне – один из основных, но не единственный параметр, лимитирующий эффективность осаждения. Его влияние на сепарацию взвеси из вращающегося потока происходит опосредованно, через инерционные свойства сепарирующихся частиц. Поэтому в расчетах необходимо вместе с характерным радиусом принимать во внимание диаметр и плотность частиц, входную скорость, плотность и динамический коэффициент вязкости потока, т. е. все параметры, входящие в безразмерный комплекс Re_g . В связи с этим представляется целесообразным использование гибридных моделей RANS с фильтрацией уравнений Навье – Стокса на базе комплекса Re_g , что позволяет выполнять расчеты с приемлемым вычислительным ресурсом.

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

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 [4], а получаемый результат (решение в одной точке) не позволяет работать с визуализацией.

В итоге построена численная 3D-модель циклона ЦН-15 DN 500. Принята модель осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса при исходном ламинарном течении. Использование осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса требует намного меньших вычислительных ресурсов по сравнению с другими моделями. В рамках RANS моделируется вклад в среднее движение всех масштабов турбулентности. Для определения скорости и давления потока по сечениям циклона проведены расчеты при входной скорости потока 3,5–20,0 м/с. Снижение скорости происходит около стенок циклона. Максимум значения скорости наблюдается на выходном сечении. После тангенциального входа поток газа приобретает в корпусе циклона осесимметричное винтовое движение вниз. После кольцевой зоны вертикальная составляющая скорости потока вблизи стенки корпуса при перемещении вниз начинает уменьшаться из-за роста давления в сужающейся конической части циклона. Наблюдается снижение давления в выходном сечении по сравнению с входным в среднем на 10–12 Па [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 [6–7].

Циклон рассматривается в качестве циклонного элемента в батарейном циклоне.

Методами вычислительной гидродинамики построена 2D-мо-

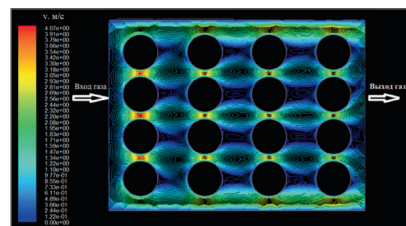


Рис. 1. Эпюры скорости в первой модели батарейного циклона

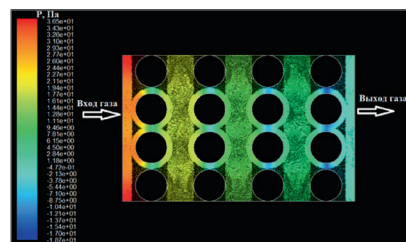


Рис. 2. Распределение статического давления во второй модели батарейного циклона

дель серийного батарейного циклона ЦБ-16, состоящего из 16 циклонных элементов диаметром 245 мм с полуулиточным подводом газа. Рассмотрены две модели батарейного циклона, различающиеся расположением циклонных элементов: в первой модели циклонные элементы крайних (первого и четвертого) продольных по отношению к направлению потока рядов расположены на расстоянии 100 мм от стенок мультициклона, а во второй – непосредственно у его стенок.

Запыленный поток газа поступает во входное окно мультициклона и засасывается во входные патрубки циклонных элементов. Сепарирующиеся частицы из потока запыленного газа осаждаются в бункере, а очищенный газ выводится через выходное окно. Циклонные элементы установлены ступенчато по ходу движения газов таким образом, что входные патрубки циклонных элементов последующего ряда располагаются ниже предыдущего. Нижние крышки входных патрубков последнего (по ходу газа) поперечного ряда циклонных элементов являются частью нижней трубой

доски, что обеспечивает вынос осевшей на ней пыли.

В численных расчетах данной конструкции принята статистическая двухпараметрическая модель турбулентности $k-\varepsilon$ [8]. Скорость входа запыленного потока газа в батарейный циклон принята равной 4 м/с. На рис. 1, 2 в качестве примера представлены расчетные скорости (первая модель) и распределение статического давления (вторая модель) в горизонтальном сечении батарейного циклона. Расчеты показали, что максимумы давления приходятся на лобовые части элементов не только в первом, но и в последующих рядах. Это позволяет оптимизировать расположение полуулиточных входов циклонных элементов.

Наибольшие значения скоростей наблюдаются между циклонными элементами, что объясняется сужением потока между ними.

Результаты численных исследований показывают, что у второй модели в рабочем пространстве между элементами выше как значения скорости, так и значения давления, хотя расходные характеристики на входе в корпус одинаковы у обеих моделей. Это объясняется прохождением потока во второй модели только в промежутках между циклонными элементами. В первой модели значительная часть потока проходит в зоне у стен корпуса батарейного циклона, создающей меньшее сопротивление, чем области между элементами. Расчеты наглядно показывают, что эти

зоны представляют местные сопротивления типа одностороннего внезапного сужения и внезапного расширения. Созданная численная модель мультициклона позволила оценить влияние различных факторов на эффективность улавливания пыли в циклонах, а также создать методику оценки эффективности пылеуловителя [9].

Полученные результаты исследований дают возможность оптимизировать расположение входов полуулиточных патрубков циклонных элементов в батарейном циклоне по первой и второй моделям. Они позволяют также более точно учесть гидравлическое сопротивление аппарата при определении наиболее эффективного расположения циклонных элементов. ■

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. 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. № 4. С. 223–225.
5. Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Численные и натурные исследования аэродинамических свойств и эффективности использования циклонного фильтра для санитарной очистки выбросов в промышленности // Сб. науч. трудов по мат-лам Междунар. науч.-практ. конф. «Наука, образование, общество: тенденции и перспективы»: В 7 ч. М.: Ар-Консалт, 2014. С. 114–115.
6. 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.
7. 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.
8. Замалиева А.Т., Беляева Г.И. Изменение аэродинамических свойств и эффективности в циклонных аппаратах посредством численных и натурных исследований // Вестник Казанского технологич. ун-та. 2015. Т. 18. № 4. С. 134.
9. Беляева Г.И., Зиганшин М.Г. Повышение энергоэффективности применения батарейного циклона для очистки природного газа // Сборник мат-лов III Междунар. (IX Всероссийской) конф. «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции». Чебоксары: Изд-во ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2016. С. 459–463.

REFERENCES

1. Kantyukov 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. Kantyukov 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. Kantyukov 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 uglevodorodnogo syr'ya = The Transport and the Storage of Petroleum Products and Hydrocarbons*, 2015, No. 2, P. 3–7. (In Russian)
4. Kantyukov 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. 4, P. 223–225. (In Russian)
5. 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)*
6. Kantyukov 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)
7. Kantyukov 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)
8. 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)
9. 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)