

УДК 621.928.93

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ЦИКЛОНЕ С РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КОНТУРОМ

к-т техн. наук П.С. ГРЕБЕНЧУК, Д.Ю. МЫТЬКО

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

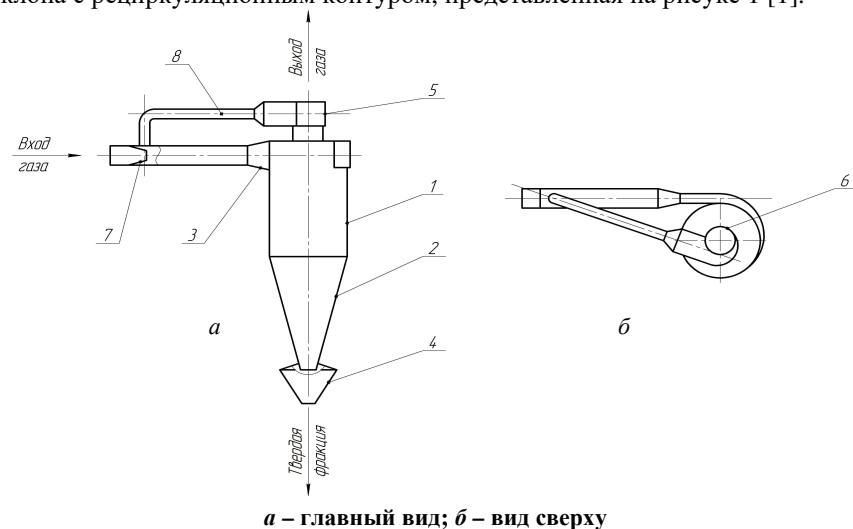
Данная работа посвящена разработке научных основ многоступенчатой сепарации тонкодисперсных частиц в поле центробежных сил с применением рециркуляции несущего потока. Рассмотрена новая конструкция центробежного пылеуловителя с рециркуляционным контуром и исследованы параметры его работы. Предложена математическая модель, описывающая движение газового потока в циклоне и рециркуляционном контуре. Получены зависимости потерь давления, полной скорости потока и ее составляющих во всех зонах аппарата от скорости газового потока на входе в циклон. На основании анализа полученных результатов оценено влияние режимных и конструктивных параметров циклона на его эффективность и энергозатраты.

Ключевые слова: очистка газов, центробежный пылеуловитель, рециркуляционный контур, скорость газового потока, эффективность, защита окружающей среды.

Введение. Проблема защиты окружающей среды от выбросов загрязненного газа чрезвычайно актуальна. По данным ООН ежегодно в атмосферу выбрасывается 2,5 млн т пыли. Экологические проблемы, обусловленные выбросами в атмосферу загрязненных газовых потоков, постепенно обостряются в связи с ростом промышленного производства и степени загрязнения воздушного бассейна. По мнению американских экологов, количество пыли, образующейся в промышленности, будет увеличиваться ежегодно на 4% за счет роста промышленного производства, что приведет к серьезному загрязнению атмосферы и негативному влиянию на здоровье людей. В связи с этим очистка промышленных выбросов с отходящими газами представляет одну из самых актуальных задач как в санитарном, так и в технологическом и экономическом отношениях.

Постоянный рост количества пыли, образующейся в промышленности, потребует совершенствования существующего пылеулавливающего оборудования, среди которого наиболее часто используются центробежные (циклонные) пылеуловители. Основными параметрами, характеризующими работу циклонных пылеуловителей, является эффективность улавливания пыли и гидравлическое сопротивление. Эффективность улавливания пыли зависит от многих факторов (геометрических размеров, режимных параметров). Эффективность очистки газов может быть существенно увеличена за счет применения внешней частичной рециркуляции газового потока. Идея таких конструкций состоит в том, чтобы часть отходящего газового потока перенаправить назад во входной патрубке циклона. До недавнего времени научные исследования циклонных пылеуловителей с внешней или внутренней рециркуляцией потока в Республике Беларусь не проводились. Наши исследования имеют целью восполнить этот пробел.

Основная часть. На основании анализа существующих циклонов с рециркуляцией потока, распределения скоростей и давлений в них, а также траекторий движения дисперсных частиц разработана новая конструкция циклона с рециркуляционным контуром, представленная на рисунке 1 [1].



а – главный вид; б – вид сверху

Рисунок 1. – Циклон с частичной рециркуляцией газового потока

Пылеуловитель работает следующим образом. Запыленный газовый поток подается в центральное отверстие трубы Вентури 7 и далее во входной патрубке циклона 3. В циклоне твердые частицы под действием центробежных сил движутся к стенкам цилиндрического корпуса 1, и далее по коническому днищу 2 поступают в нижерасположенный бункер 4. Самые мелкие твердые частицы следуют за потоком воздуха и поступают в выхлопную трубу 6 циклона, где они движутся в основном в пристеночной области. Далее часть уже очищенного газового потока в выхлопной трубе с наибольшим содержанием неуловленных мелких частиц поступает в улитку 5, откуда направляется по рециркуляционной трубе 8 обратно в трубу Вентури 7 и далее – на повторное улавливание. Часть очищенного газового потока с наименьшим содержанием частиц движется в выхлопной трубе 6 ближе к центру и выводится из аппарата.

Подача мелкой неуловленной фракции частиц обратно в циклон повышает концентрацию частиц в циклоне, вероятность их столкновения и образования агломератов. В результате достигается более высокая эффективность очистки. В выхлопной трубе может быть дополнительно установлен лопастной раскручиватель, позволяющий снизить потери давления в аппарате.

Для математического описания движения газового потока в данном циклоне была выбрана RNG k - ε -модель, полученная при помощи теории ренормализованных групп [2]. Она имеет схожую форму со стандартной k - ε -моделью, но включает следующие улучшения:

- дополнительный член в уравнении для ε , который улучшает точность вычислений для жидкостей с высокими скоростями деформаций;
- учтено влияние завихренности на турбулентность, что увеличивает точность для высокозавихренных жидкостей;
- аналитические формулы для турбулентных чисел Прандтля, тогда как стандартная модель использует заданные пользователем постоянные значения;
- аналитически полученные формулы для эффективной вязкости, которые предназначены для жидкостей с низкими числами Рейнольдса. Тем не менее, эффективное использование этой опции зависит от правильного рассмотрения пристеночной области.

Данные улучшения делают RNG-модель более точной и надежной, позволяя эффективно применять ее для более широкого класса жидкостей по сравнению со стандартной k - ε -моделью.

Окончательные уравнения модели имеют следующий вид [2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь опишем лишь вновь введенные величины:

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ – обратные эффективные числа Прандтля для k и ε , соответственно;

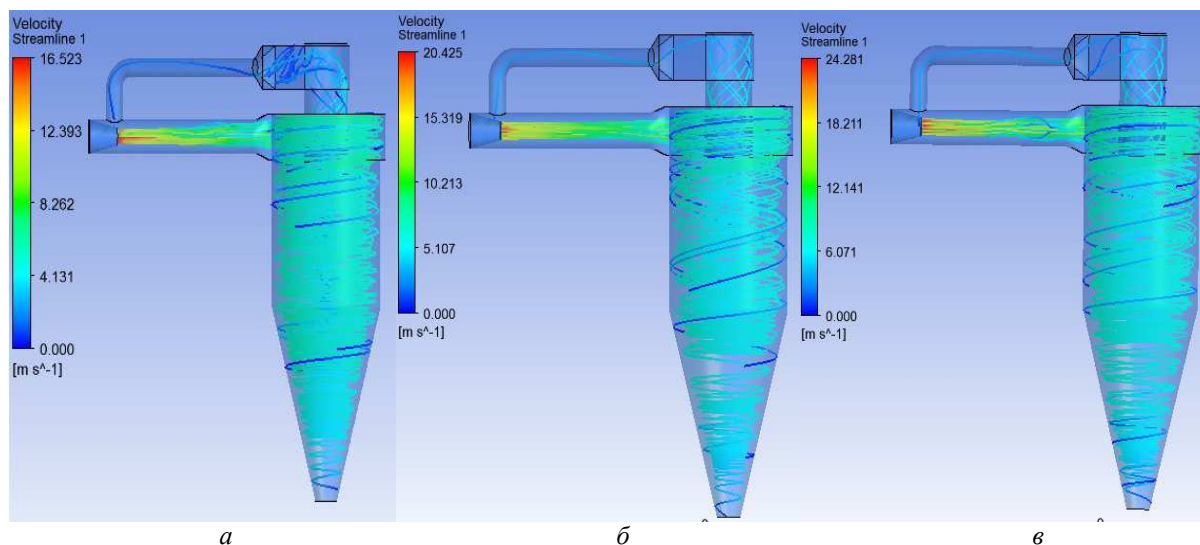
μ_{eff} – эффективная вязкость среды. Данная вязкость приблизительно равна μ_t из стандартной k - ε модели для высоких чисел Рейнольдса. Для низких чисел Рейнольдса создателями модели [2] предлагается дополнительное дифференциальное уравнение, позволяющее более точно вычислить μ_{eff} .

Для создания геометрической модели циклона с рециркуляционным контуром было использовано 3D-моделирование. Сетка состоит из тетраэдров с уменьшением элементарной ячейки к стенке модели [3]. Размер элементарной ячейки – $10 \cdot 10^{-3}$ м, число ячеек после генерации составило более 289 000, что говорит о достаточно высокой точности сетки.

Моделирование движения газа в циклоне с рециркуляционным контуром проводилось при трех различных скоростях на входе в патрубок, которые определялись из диапазона условной скорости газа [3]. Плотность газа была принята $1,225 \text{ кг/м}^3$ (плотность воздуха при нормальных условиях). Диаметр цилиндрической части циклона 0,3 м, входного патрубка и рециркуляционной трубы – 0,085 м и 0,045 м, соответственно.

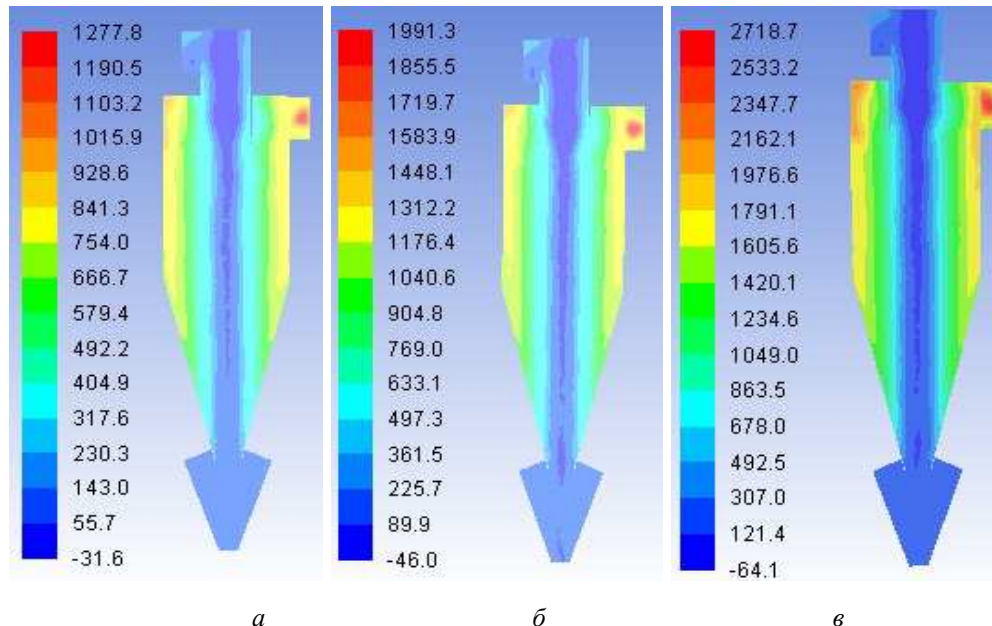
На рисунке 2 показан план скоростей потока в циклоне с рециркуляционным контуром при разных скоростях газа на входе.

На рисунке 2 показано, что газовый поток движется в пристеночной области циклона с максимальной скоростью у входа в патрубок, которая постепенно снижается к нижней части цилиндрического корпуса. Также можно заметить, что поток заходит в рециркуляционный контур циклона, тем самым можно сказать, что рециркуляция газового потока осуществляется.



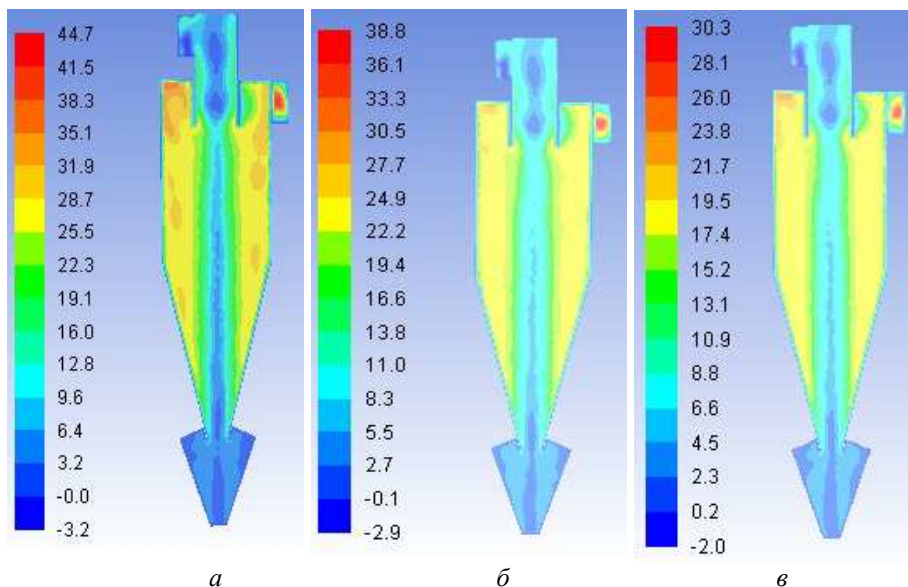
Скорость газа во входном патрубке: *a* – 16 м/с; *б* – 20 м/с; *в* – 24 м/с
Рисунок 2. – Скорость движения потока по траекториям

На рисунке 3 представлены результаты моделирования гидравлического сопротивления в циклоне с рециркуляционным контуром. Можно заметить, что гидравлическое сопротивление увеличивается у стенок циклона, а с увеличением скорости газа на входе в аппарат оно снижается у стенок конической части. При этом гидравлическое сопротивление, а значит и потери давления в аппарате в целом увеличиваются в данной конструкции по сравнению с традиционными вариантами циклонов незначительно, то есть использование рециркуляционного контура не приведет к существенному росту энергопотребления установки при значительном повышении эффективности пылеулавливания.



Скорость газа во входном патрубке: *a* – 16 м/с; *б* – 20 м/с; *в* – 24 м/с
Рисунок 3. – Гидравлическое сопротивление в циклоне, Па

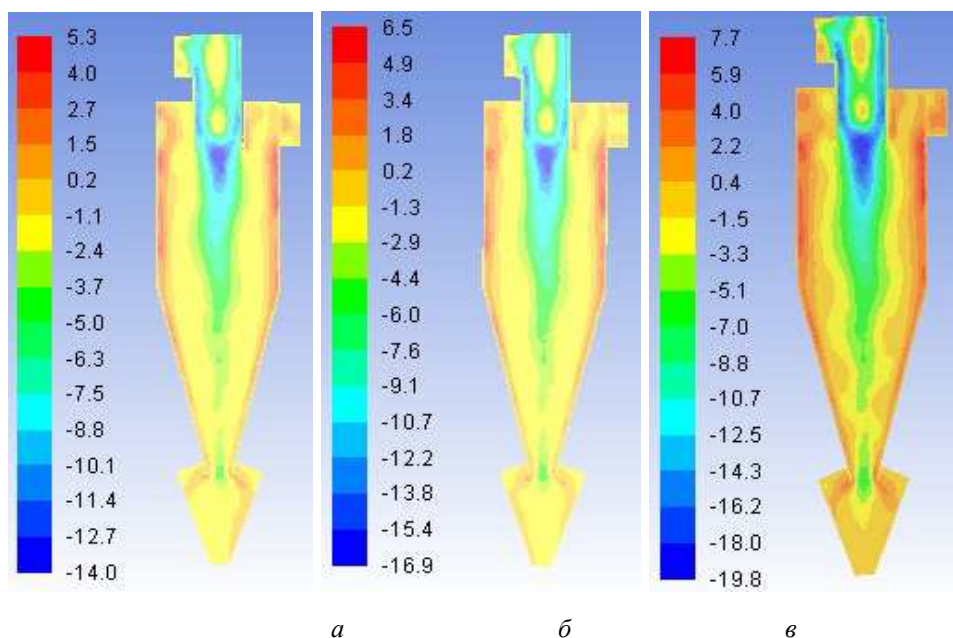
На рисунке 4 представлены планы тангенциальных скоростей в циклоне с рециркуляционным контуром. Как известно, рост этой составляющей полной скорости потока повышает эффективность пылеулавливания, поскольку тем самым повышается центробежный фактор разделения [4]. На рисунке 4 видно, что с увеличением скорости газа во входном патрубке снижается скорость вихря по центральной оси аппарата. В то же время скорость восходящего центрального вихря, как и нисходящего у стенок аппарата, увеличивается, что говорит об адекватности модели.



Скорость газа во входном патрубке: *a* – 16 м/с; *б* – 20 м/с; *в* – 24 м/с

Рисунок 4. – Тангенциальная скорость в циклоне, м/с

Наконец, на рисунке 5 изображены результаты моделирования осевой скорости в циклоне с рециркуляционным контуром. Эта составляющая полной скорости повышает производительность аппарата. Как известно, эффективно влиять на направление вектора полной скорости потока, то есть на соотношение осевой и тангенциальной скоростей, можно изменением геометрии самого циклона: угла наклона входного патрубка (в нашем случае он равен нулю) и в меньшей степени – высоты конической и цилиндрической части [4]. Поэтому с увеличением скорости газа во входном патрубке осевая скорость должна увеличиваться как в центре аппарата, так и в пристеночной области, что мы и наблюдаем на рисунке 5. При этом интенсивность разрежения по оси циклона также увеличивается с ростом скорости на входе (рисунок 5, *в*).



Скорость газа во входном патрубке: *a* – 16 м/с; *б* – 20 м/с; *в* – 24 м/с

Рисунок 5. – Осевая скорость в циклоне, м/с

Заключение. В результате проведенных исследований было смоделировано движение воздушного потока в циклоне с рециркуляционным контуром. Установлено, что наибольшую скорость имеет поток у стенок аппаратов в верхней их части (на входе в циклон), далее скорость газа снижается и имеет минимальное значение в нижней конической части.

Значительная часть частиц на выходе из выхлопной трубы движется у стенок и поступает в рециркуляционный контур, через который возвращается в аппарат на повторное отделение. Таким образом, в предложенной конструкции центробежного пылеуловителя удастся достичь более высокой степени очистки газа, в особенности от сверхтонких частиц пыли.

Анализ изменения всех составляющих полной скорости газового потока, а также гидравлического сопротивления аппарата в зависимости от скорости во входном патрубке показал адекватность предлагаемой математической модели и возможность ее использования для оценки вышеуказанных параметров циклонов различных конструкций и корректировки их конструктивных и режимных параметров с целью повышения эффективности и снижения энергозатрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мытько, Д.Ю. Проподимость газа в циклоне с рециркуляционным контуром / Д.Ю. Мытько, Д.И. Мисюля, П.С. Гребенчук // Нефтехимия – 2019: материалы II междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 16–18 сент. 2019 г. / Белар. Гос. тeнг. ун-т. – Минск : БГТУ, 2019. – С. 169–175.
2. Renormalization group modeling and turbulence simulations / S.A. Orszag [et al.] // International conference on near-wall turbulent flows. – Tempe, Arizona, 1993. – 1031 p.
3. Шаблий, Л.С. / Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent : учеб. пособие / Л.С. Шаблий, А.В. Кривцов, Д.А. Колмакова. – Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 108 с.
4. Гупта, А. Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М. : Мир, 1988. – 588 с.

Поступила 02.07.2020

RESEARCH OF THE MOTION OF A GAS FLOW IN A CYCLONE WITH A RECIRCULATION CIRCUIT

P. HREBIANCHUK, D. MYTSKO

This work is devoted to the development of scientific foundations for multistage separation of fine particles in the field of centrifugal forces using the recirculation of the carrier flow. A new design of a centrifugal dust collector with a recirculation loop is considered and the parameters of its operation are investigated. A mathematical model is proposed that describes the movement of a gas flow in a cyclone and in a recirculation loop. The influence of the operating parameters of the cyclone on its efficiency and energy consumption is analyzed. The dependences of pressure losses, total flow rate and its components in all zones of the apparatus on the gas flow rate at the cyclone inlet are obtained. Based on the analysis of the results obtained, the influence of the operating and design parameters of the cyclone on its efficiency and energy consumption was evaluated.

Keywords: *gas cleaning, centrifugal dust collector, recirculation circuit, gas flow rate, efficiency, environmental protection.*