

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОННОГО СЕПАРАТОРА

MATHEMATICAL MODEL OF CYCLONE SEPARATOR EFFICIENCY

**Addas Safouh
L. Schwarzburg**

Summary. The article is devoted to methods of mathematical modeling of the main output characteristic of a cyclone separator — the efficiency of cleaning the incoming air. In particular, an approach to the construction of differential equations for the dynamics of the concentration difference of solid particles in the input and output flows of a cyclone is considered, based on the joint solution of the equations of mass transfer and dynamics of the cyclone drive motor. Special attention is paid to the efficiency of separation of solid particles for subsequent disposal. The results obtained can be used to build and analyze extreme-type automatic control systems that minimize the concentration of volatile organic compounds and solid particles in production work areas. The introduction of such an approach, in the future, will allow for a transition from air purification quality control to direct control of the microclimate of production areas, which will certainly have a beneficial effect not only on working conditions and safety, but also increase the economic efficiency of production, thus reducing the cost of final products. The use of mathematical models will further provide the possibility of analytical design of air purifiers in general and cyclone separators in particular.

Keywords: air purification, cyclone, efficiency, mathematical model, recycling.

Аддас Сафух

Аспирант, МГТУ «СТАНКИН»

addassafouh@gmail.com

Шварцбург Леонид Эфраимович

д.т.н, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

lesh@stankin.ru

Аннотация. Статья посвящена методам математического моделирования основной выходной характеристики циклонного сепаратора — эффективности очистки поступающего воздуха. В частности, рассматривается подход к построению дифференциальных уравнений динамики перепада концентраций твердых частиц во входных и выходном потоках циклона, основанный на совместном решении уравнений массообмена и динамики приводного электродвигателя циклона. Особое внимание уделяется эффективности разделения твердых частиц с целью последующей утилизации. Полученные результаты могут быть использованы для построения и анализа систем автоматического управления экстремального типа, позволяющих минимизировать концентрацию летучих органических соединений и твердых частиц в рабочих зонах производств. Внедрение подобного подхода, в перспективе, позволит осуществить переход от контроля качества воздухоочистки к непосредственному управлению микроклиматом производственных зон, что безусловно благотворно отразится не только на условиях и безопасности труда, но и повысит экономическую эффективность производств, снижая, таким образом, себестоимость конечной продукции. Применение математических моделей обеспечит в дальнейшем возможность аналитического конструирования воздухоочистителей в целом и циклонных сепараторов в частности.

Ключевые слова: воздухоочистка, циклон, эффективность, математическая модель, утилизация.

Введение

Обеспечение качества воздуха в рабочей зоне промышленных предприятий всех областей народного хозяйства является наиболее актуальной задачей, решаемой, на настоящем этапе развития использованием аппаратов циклонного типа — сепараторов. Основным показателем, характеризующим работу циклонного сепаратора, является эффективность воздухоочистки. Построение действительно высокоэффективных систем воздухоочистки невозможно без наличия адекватных математических моделей, характеризующих распределение концентраций опасных частиц в воздухе. Один из подходов к построению такой математической модели и рассматривается в настоящем исследовании.

Материалы и методы

При проведении исследования использованы материалы современных публикаций, релевантных теме ис-

следования. К методам исследования относится анализ научных источников, математическое моделирование.

Литературный обзор

Проблеме оценки эффективности циклонных сепараторов посвящено большое количество исследований последних лет, как в области прикладной аэродинамики, так и в области экологии. Так, исследование [1] изучает природу сил, отсеивающих тяжелые частицы в сепараторе и приводит к выводу о доминирующем влиянии инерционных (кориолисовых) сил на оседание. Также, показано, что плотность и эффективность сепарации возрастают с массой и размерами отсеиваемых частиц. Авторы статьи [2] показывают повышение экономической эффективности за счет утилизации и повторного использования сепарированных частиц. При этом ставится проблема не только очистки воздуха но и разделения частиц по массе и размеру в бункере сепаратора.

В статье [3] предлагается конструкция циклонного сепаратора, позволяющая за счет высоких значений центробежной силы улавливать частицы диаметром до 10 мкм, что, на настоящий момент является одной из основных проблем при очистке воздуха. Также, существует описанное в [4] усовершенствование проточной части десендера, решающего аналогичную задачу, но имеющую более узкое применение — при нефтепереработке.

Статья [5] посвящена влиянию угла раскрытия V-образного циклонного сепаратора на качество отделения мелкодисперсных частиц и показано, что наибольшая эффективность достигается при минимальных значениях угла.

Подходу к моделированию циклонного сепаратора посвящена статья [6], в которой предложена модель турбулентности напряжений Рейнольдса, численно моделируемая методом конечных элементов и позволяющая формировать оценки абсолютного КПД и эффективности сепарации. Недостатком данной модели является ее высокая алгоритмическая сложность при оценке макроскопических параметров.

Статья [7] посвящена подходам к разработке циклонных сепараторов с повышенной эффективностью при улавливании частиц диаметром 10–20 мкм. Показаны ограничения подобного типа решений, связанные с узкоспециализированностью и сделан вывод о применении каскадного включения различных типов сепараторов.

Также, влияние диаметра частиц и положения впрыска на эффективность сепарации показано в исследовании [8]. Авторы также делают вывод о необходимости каскадирования специализированных циклонов.

Несколько иную с практической точки зрения, но необходимую на этапе теоретических исследований задачу — сепарацию аэрозолей (жидких взвесей в воздушном потоке) рассматриваются в исследовании [9]. Авторами получены математические модели, с рядом ограничений пригодные и для рассматриваемого в настоящем исследовании сепаратора.

Исследование [10] посвящено оптимизации параметров сепараторов на основе предложенной авторами модели линейного программирования, что может быть полезно в дальнейших исследованиях.

Результаты

Исследуемый циклонный сепаратор имеет три входа для улавливания частиц различного диаметра, общий бункер и выходной поток. Так как воздушные потоки

на входе протекают в ламинарном режиме, то к каждому из входов в первом приближении может быть применен принцип суперпозиции — потоки различных входов не оказывают перекрестных влияний друг на друга. В связи с этим можем использовать приведенные в [10] соотношения взаимосвязи параметров циклона (1)–(2).

$$\eta \sim \frac{D_1}{D} \cdot V \cdot e^{-\left(\frac{d}{D}\right)^2}, \tag{1}$$

$$V \sim D_1^{\frac{3}{2}}, \tag{2}$$

- где η — эффективность сепарации;
- V — скорость воздушного потока на входе циклона, м/с;
- D_1 — диаметр входа циклона, м;
- D — диаметр циклона, м;
- d — диаметр сепарируемых частиц, м.

Используя полученные соотношения, можем получить статические характеристики зависимости эффективности сепарации от скорости воздушного потока, для циклона диаметром 0,5 м при фильтрации частиц диаметром 25 мкм, показанные на рис. 1.

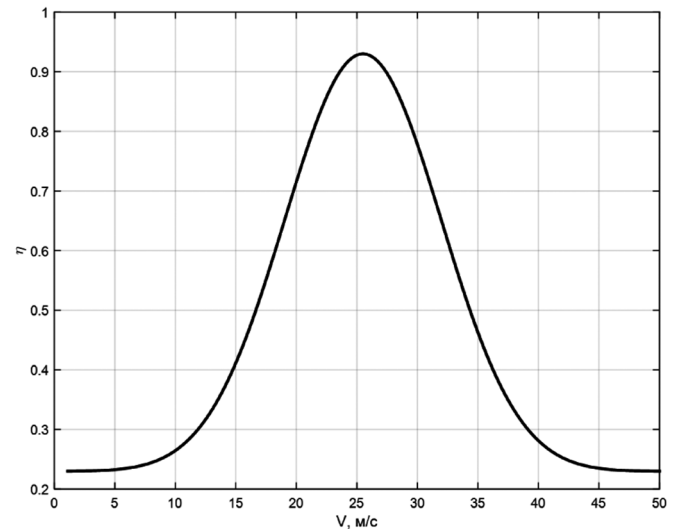


Рис. 1. Статическая характеристика эффективности циклона

Из рис. 1 может быть зафиксирован максимум эффективности, составляющий 93 % при скорости воздушного потока 25,1 м/с. При этом отклонение от оптимального значения ведет к резкому спаду эффективности. Данная проблема может быть решена путем стабилизирующего управления воздушным потоком. Так, скорость воздушного потока связана с частотой вращения приводного двигателя соотношением (3):

$$V \sim \omega^{\frac{2}{3}} \tag{3}$$

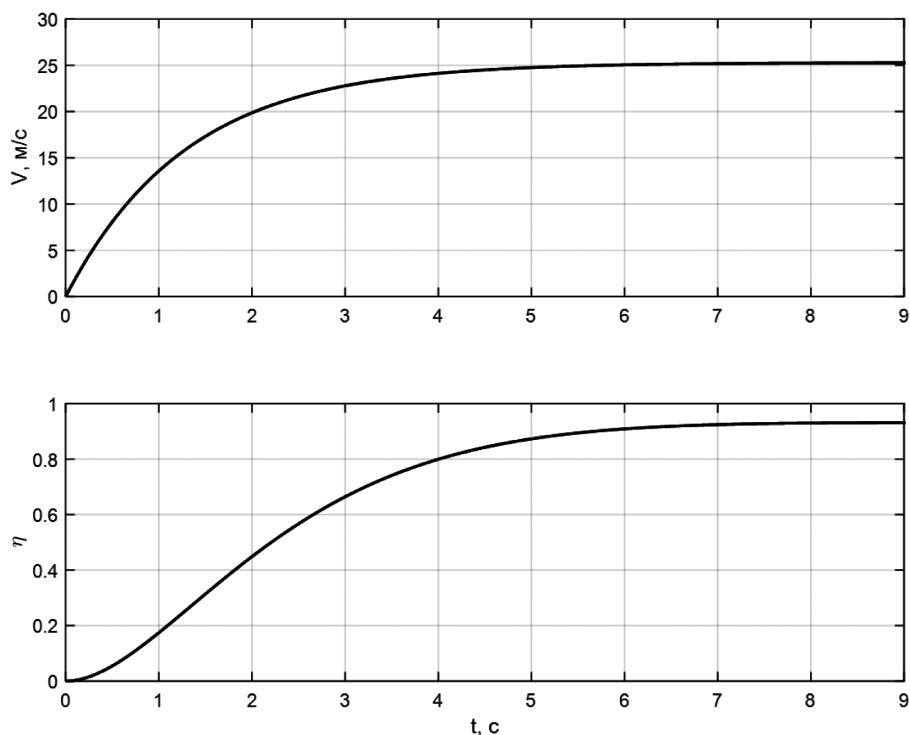


Рис. 2. Динамические характеристики скорости воздушного потока и эффективности циклона

Дополнив статические характеристики уравнением динамики приводного двигателя:

$$\frac{L}{R} \cdot \frac{d\omega}{dt} + k_m \cdot \omega = U, \quad (4)$$

где L — индуктивность обмотки якоря;
 R — сопротивление обмотки якоря;
 k_m — конструктивный коэффициент двигателя.

Можем получить динамические характеристики скорости воздушного потока и производительности при включении циклона (рис. 2).

Обсуждение

Из рисунка 2 можем сделать вывод о возможности описания воздушного потока дифференциальным уравнением первого порядка, а эффективность — уравнением второго порядка ввиду наличия нелинейной связи со скоростью воздушного потока. Ввиду монотонности динамических характеристик можно сделать вывод о воз-

можности поддержания оптимального режима фильтрации циклонного сепаратора за счет регулирования частоты вращения приводного двигателя циклона. Для управления могут быть использованы как классические, так и более современные законы управления несущественно нелинейными объектами. Также, ввиду наличия максимума статических характеристик (рис. 1), возможно получение оптимального по эффективности управления.

Заключение

Рассмотренная в ходе настоящей математическая модель эффективности циклона с регулируемой скоростью воздушного потока может быть использована в составе замкнутой системы вентиляции, сбора твердых взвесей и их утилизации путем, например, повторной или дальнейшей переработки. Перспективным направлением дальнейших исследований видится исследование оптимальных алгоритмов управления замкнутыми системами воздухоочистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вьюгова, К.Д. Определение эффективности и гидравлического сопротивления циклонного сепаратора ЦН — 11 / К.Д. Вьюгова // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика: Материалы конференции. В 3-х томах, Казань, 07–08 декабря 2021 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 2. — Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. — С. 333–336.
2. Техничко-экономическое обоснование применения мультивихревого классификатора-сепаратора / В.Э. Зинуров, А.Р. Галимова, И.Г. Ахметова, И.Н. Мадышев // Вестник Самарского государственного экономического университета. — 2022. — № 7(213). — С. 33–44.
3. Зинуров, В.Э. Улавливание мелкодисперсных частиц пыли из газовых потоков на компрессорных станциях / В.Э. Зинуров, А.Ф. Зиангиров // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции молодых ученых, Альметьевск, 13 ноября 2020 года. — Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2020. — С. 398–401.

4. Совершенствование проточной части десендеров циклонного типа с использованием мультифазного коэффициента относительной скорости движения дискретных частиц / А.В. Трулев, С.Ф. Тимушев, А.В. Ломакин, А.В. Клипов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2023. — № 7(760). — С. 93–106.
5. Абдуллина, А.А. Влияние угла раскрытия V-образных сепарационных элементов на эффективность пылеуловителя при очистке воздуха от пищевой пыли / А.А. Абдуллина, В.Э. Зинуров, Л.Т. Воронина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2024. — № 200. — С. 302–309.
6. Попкова, О. С. Численное моделирование циклонного сепаратора / О.С. Попкова, Н.И. Баязитова // Тенденции развития науки и образования. — 2021. — № 74-4. — С. 79–82.
7. Галиченко, Д.А. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в сепарационном устройстве / Д.А. Галиченко // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 3. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. — С. 244–245.
8. Прокофьева, И.Ю. Влияние диаметра частиц и положения впрыска на эффективность разделения циклонных сепараторов / И.Ю. Прокофьева // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: Сборник статей по материалам ССХV международной научно-практической конференции, Москва, 07 июня 2021 года. Том 20 (215). — Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Интернаука», 2021. — С. 606–608.
9. Комбинированный сепаратор для подогрева, охлаждения воздуха и удаления влаги на всасе КВОУ / О.О. Мильман, В.Б. Перов, А.В. Птахин [и др.] // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену : Материалы конференции. В 2-х томах, Москва, 17–22 октября 2022 года. Том 2. — Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022. — С. 79–80.
10. Терехова, О.Н. Пневмоцентробежная классификация мелкодисперсных частиц в мукомольном производстве / О.Н. Терехова, Я.С. Дуюнова // Академическая наука на службе обществу и государству: Сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 02 ноября 2022 года. — Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. — С. 35–44.

© Аддас Сафух (addassafouh@gmail.com); Шварцбург Леонид Эфраимович (lesh@stankin.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»