

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛОНА И ЕЁ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Безик Д.А., Романеев Н.А.

Брянский государственный аграрный университет, с.Кокино

Ключевые слова: циклон, пылеулавливание, математическая модель, математическое моделирование, критерии подобия, процесс центробежного пылеулавливания.

Аннотация. Значительная часть работ при создании и реконструкции предприятий приходится на решение вопросов очистки промышленных выбросов. Широкое применение для пылеочистки нашли циклоны. Применение циклонов из имеющейся номенклатуры не всегда приводит к оптимальному решению. Имеется ряд исследований, посвященных прогнозированию характеристик циклонов в зависимости от их геометрических и эксплуатационных параметров. Их использование в САПР позволяет ускорить процесс проектирования и оптимизации циклонов для пылеочистки. На основе анализа расчётных зависимостей, описанных в литературе, составлен алгоритм и написана программа для автоматизированного расчёта параметров циклонов для пылеочистки в зависимости от их геометрических и эксплуатационных параметров.

Ежегодно в воздух предприятиями металлургии, промышленности выбрасывается более 250 млн. т мелкодисперсной пыли. Загрязнение атмосферы оказывает неблагоприятное воздействие на человека, флору и фауну. Часто проблема очистки промышленных выбросов решается с помощью циклонов. Это вызвано рядом их достоинств: простотой изготовления и небольшой стоимостью; высокой надёжностью; сохранением требуемого уровня эффективности очистки с ростом концентрации твёрдой фазы и др. Для исследования самых разнообразных явлений и процессов очистки в настоящее время широко применяется математическое моделирование. Применение метода математического моделирования с использованием возможностей современной вычислительной техники, позволяет учесть многочисленные факторы и зависимости между ними, сделать оптимальный выбор режимов эксплуатации, разработать новые модели циклонов, адаптированных к конкретным условиям работы.

Выбор параметров циклонного аппарата и режима его эксплуатации – сложный процесс, требующий учёта множества требований (эффективность пылеулавливания, производительность, габариты, металлоёмкость и т. д.). Значительно упростить, ускорить и удешевить процесс проектирования позволяет применение систем автоматизированного проектирования (САПР), одной из составляющих которых является программное обеспечение [1 - 2].

В литературе имеется ряд работ, посвященных методике расчета циклонов [4-10]. Используя полученные в них результаты, по заданным параметрам циклона, режиму его эксплуатации и свойствам пылегазовой смеси можно рассчитать основные эксплуатационные параметры циклона. Это позволяет предложить методику автоматического расчета циклона и реализовать её в виде прикладного программного обеспечения. Предлагаемая методика позволяет решать задачу расчета технических параметров циклона (можно использовать для прогнозирования параметров циклона при его проектировании) и задачу выбора циклонных аппаратов для конкретного производства.

Методика расчёта параметров произвольного циклонного аппарата

1. Ввод исходных данных: Q_0 – расход, м³/с; ρ_g – плотность газа, кг/м³; ρ_c – плотность частиц, кг/м³; n – число циклонов в группе; $N_{ex}(d_u)$ – фракционный состав пыли; R_0 – радиус циклона, м; f'_{ex} – относительная площадь входа; $d'_{вых}$ – относительный диаметр выхлопной трубы; β – угол ввода газов в циклон; $r'_{вых}$ – относительный радиус выхлопной трубы; $h'_{вых}$ – относительная величина заглубления выхлопной трубы в циклон; H_c' – относительная высота цилиндрической части циклона, находящаяся ниже среза выхлопной трубы; H_k' – относительная высота конической части циклона (геометрические параметры рассматриваются в относительных величинах, выраженных в долях радиуса цилиндрической части циклона).

2. Определение геометрического критерия подобия $a_{кр}$ по заданным геометрическим параметрам циклона [3]:

– для винтового ввода:

$$a_{кр} = 0,8671 + 12,0494r_{вых}'^2 - 11,4962r_{вых}'^2 H_c' - 3,9959r_{вых}' + 3,4078r_{вых}' H_c'^2 + 3,0590r_{вых}' H_c' - 2,4420r_{вых}' H_k' H_c'^2 - \\ - 2,3250r_{вых}'^2 h_{вых}' - 2,1426r_{вых}' h_{вых}' H_c'^2 + 1,8557r_{вых}' H_k' H_c' + 1,6779r_{вых}'^2 h_{вых}' H_c'^2 + 1,5232r_{вых}'^2 H_k' H_c'^2 - 1,0903H_c'^2 + \\ + 1,0645r_{вых}' h_{вых}' H_c' + 0,9718r_{вых}' h_{вых}' H_k' H_c'^2 - 0,8486r_{вых}'^2 h_{вых}' H_k' H_c'^2 - 0,8081r_{вых}' h_{вых}' H_k' H_c' + 0,6271H_k' H_c'^2 + (1) \\ + 0,6217r_{вых}' h_{вых}' + 0,6021r_{вых}'^2 h_{вых}' H_k' H_c' - 0,5634H_k' H_c' + 0,5166h_{вых}' H_c'^2 - 0,4807r_{вых}'^2 H_k' - 0,3041h_{вых}' H_c' + \\ + 0,2414r_{вых}' H_k' H_c'^2 - 0,2410r_{вых}' H_k' H_c' - 0,2240h_{вых}' H_k' H_c'^2 + 0,1929r_{вых}'^2 h_{вых}'^2 + 0,1891h_{вых}' H_k' H_c' - \\ - 0,1811r_{вых}'^2 H_k' H_c'^2 - 0,1533h_{вых}' + 0,1326r_{вых}'^2 H_k' H_c' - 0,0851r_{вых}' h_{вых}' H_k' H_c'^2 + 0,0782r_{вых}'^2 h_{вых}' H_k' H_c'^2 + \\ + 0,0762r_{вых}' h_{вых}' H_k' H_c' - 0,0657r_{вых}'^2 h_{вых}' H_k' H_c' + 0,0625H_k' H_c' - 0,0589H_k' H_c'^2 + 0,0193h_{вых}' H_k' H_c'^2 - \\ - 0,0173h_{вых}' H_k' H_c' + 0,0058r_{вых}' h_{вых}' H_k' H_c'^2 - 0,0010h_{вых}' H_k' H_c'^2 - 0,0003r_{вых}'^2 h_{вых}'^2 H_k' H_c'^2$$

– для улиточного ввода:

$$a_{кр} = 0,0346 + 7,7635 \cdot r_{вых}'^2 - 3,4051 \cdot r_{вых}'^2 \cdot H_c' - 1,5580 \cdot r_{вых}'^2 \cdot h_{вых}' + 0,7922 \cdot r_{вых}' \cdot H_c' + \\ + 0,6699 \cdot r_{вых}'^2 \cdot H_c'^2 - 0,6181 \cdot r_{вых}'^2 \cdot H_k' + 0,2631 \cdot r_{вых}'^2 \cdot H_k' \cdot H_c' + 0,1744 \cdot r_{вых}'^2 \cdot h_{вых}'^2 + \\ + 0,1530 \cdot r_{вых}'^2 \cdot h_{вых}' \cdot H_c' - 0,1389 \cdot r_{вых}' \cdot H_c'^2 - 0,0587 \cdot H_c' - 0,0495 \cdot r_{вых}'^2 \cdot H_k' \cdot H_c'^2 - (2) \\ - 0,0414 \cdot r_{вых}' \cdot H_k' \cdot H_c' + 0,0275 \cdot r_{вых}'^2 \cdot h_{вых}' \cdot H_k' + 0,0206 \cdot r_{вых}'^2 \cdot H_k'^2 + 0,0193 \cdot r_{вых}'^2 \cdot H_k' \cdot h_{вых}' - \\ - 0,0182 \cdot r_{вых}' \cdot h_{вых}' \cdot H_c' - 0,0127 \cdot h_{вых}' + 0,0027 \cdot H_k' \cdot H_c'^2 - 0,00004 \cdot r_{вых}'^2 \cdot h_{вых}'^2 \cdot H_k'^2 \cdot H_c'^2 \cdot h_{вых}'$$

2. Расчёт параметров циклона: полного коэффициента очистки η_u , коэффициента гидравлического сопротивления $\zeta_{пл}$:

– критический диаметр частиц (теоретически улавливаемых с вероятностью 100%):

$$d_{кр} = \frac{a_{кр} f'_{ex}}{\cos \beta} \sqrt{\frac{\mu_g R_0^3}{\rho_c Q_0}}; \quad (3)$$

– парциальный η_n и полный η_u коэффициент очистки:

$$\eta_n = \begin{cases} 1, & \text{при } d_u > d_{кр} \\ 0,2 \left(\frac{d_u}{d_{кр}} \right) + 0,8 \left(\frac{d_u}{d_{кр}} \right)^4, & \text{при } d_u < d_{кр} \end{cases}, \quad \eta_u = \int_0^\infty N_{ex} \eta_n d(d_u), \quad (4)$$

где d_u – текущий диаметр частиц, η_n – парциальный коэффициент очистки;

– коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\zeta_{nl} = \frac{16,5 \cdot \pi \cdot \cos^2 \beta}{a_{кр}^2 f'_{ex}{}^2}. \quad (5)$$

Методика выбора циклонных аппаратов для систем пылеочистки

1. Ввод исходных данных, в том числе η_u – требуемого коэффициента очистки.

2. Определение требуемого критического диаметра частиц $d_{кр}$ путём решения интегрального уравнения методом последовательных приближений:

$$\int_0^{\infty} \eta_n(d_u, d_{кр}) N_{ex}(d_u) d(d_u) = \eta_u. \quad (6)$$

3. Определение требуемого количества циклонов n и расчет их радиуса R_0 . При этом радиус циклона определяется исходя из заданной входной скорости и последующего округления до значений, предусмотренных ГОСТ 9617-76:

$$R_0 = \sqrt{\frac{Q_0}{f'_{ex} v_{ex} n}}. \quad (7)$$

Определение количества циклонов производится до тех пор, пока критический диаметр частиц улавливаемых батареями циклонов, не станет менее требуемого. Это обеспечивает требуемый коэффициент очистки.

4. Для найденных значений n и R_0 рассчитывается коэффициент очистки, коэффициент гидравлического сопротивления и потери давления в циклоне.

Для автоматизированного расчёта параметров циклонов была разработана объектно-ориентированная САПР, основанная на приведенной выше методике. Для расширения возможностей проектирования программа дополнительно рассчитывает угол раскрытия конуса циклона α (выбирается исходя из угла естественного откоса улавливаемой пыли), площадь поверхности циклона S (для оценки металлоёмкости аппарата), энергозатраты E (для оценки потребляемой мощности), среднюю скорость газов в поперечном сечении циклона v_{nl} , общую высоту циклона H_n . При использовании программы для проектирования систем очистки газов промышленного предприятия тип и параметры циклона выбираются из базы данных.

Программа работает в операционной среде Windows. Интерфейс представлен на рисунке 1. Результаты расчёта могут быть распечатаны и экспортированы в текстовый файл или в файл формата DXF. Это обеспечивает совместимость программы с программами документооборота и системами автоматизированного проектирования.

Существующие методики расчёта циклонных аппаратов имеют узкую область применения и не позволяют прогнозировать параметры произвольного циклона, что приводит к необходимости разработки универсальных методик расчёта параметров циклонов. Исходя из уравнений теоретической механики и аэрогидромеханики, построена математическая модель процесса центробежного пылеулавливания в циклоне, позволяющая исследовать траектории отдельных частиц [1]. Найдена аналитическая зависимость, связывающая основные факторы, влияющих на пылеулавливание в циклоне.

Расчет циклонов для пылеочистки

Файл Правка Помощь О программе

☒ улиточный ввод
☐ винтовой ввод

радиус циклона, м: 0,400
 высота цилинд. части: 3,640
 высота циклона: 7,640
 площадь входа: 0,384
 высота входа: 0,960
 радиус выхлопа: 0,590
 заглубление: 2,640
 радиус выхода для пыли: 0,300
 угол раскрытия конуса: 17,496024
 общая высота циклона, м: 3,056
 площадь поверхности: 6,967754

Физические параметры пыли и газа
 Общий расход, м³/с: 1
 Колич. циклонов x расход одного циклона, м³/с: 1 x 1
 Вязкость газа, мкПа·с: 22,2
 Плотность частиц, кг/м³: 1930
 Плотность газа, кг/м³: 1,29

Число фракций: 5
 доля фракции: 0,1 0,45 0,3 0,1 0,05
 границы фракций, мкм: 0 10 20 30 40 >40

Результат расчета
 Диаметр частиц d₅₀, мкм: 5,5541819
 Диаметр частиц d₁₀₀, мкм: 6,773393
 Скорость в плане, м/с: 1,9894384
 Входная скорость, м/с: 16,276041
 Коэффициент сопротивления: 265,1541
 Гидравлическое сопротивление, Па: 676,89153
 Энергозатраты, кВт: 0,6768915
 Коэффициент очистки: 0,9322661

Прямой расчет Обратный расчёт Выход

Рис. 1. Интерфейс расчетной программы

На основе полученных функциональных зависимостей разработана объектно-ориентированная САПР, позволяющая прогнозировать технические параметры циклонов на стадии их проектирования. Также САПР имеет базу данных известных циклонов, что позволяет выбрать тип и режим эксплуатации циклона для конкретного производства.

Список литературы

1. Варывдин В.В. Использование компьютерных программ в процессе проектирования техники для сельского хозяйства / В.В. Варывдин, Н.А. Романеев, Д. А. Безик // Конструирование, использование и надежность машин с/х назначения: сб. науч. работ. - Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2011. - №1. С. 51-55.
2. Варывдин В.В. Автоматизированное проектирование машин в процессе совершенствования техники для сельского хозяйства / В.В. Варывдин, Н.А. Романеев, Д.А. Безик, М.М. Васильченко // Конструирование, использование и надежность машин с/х назначения: сб. науч. работ науч.-техн. конф. Брянск: Изд-во Брянского ГАУ, 2015. - №1. С. 114-119.
3. Безик Д.А. Автоматизация расчета параметров циклона на основе математического моделирования процесса пылеулавливания: дисс. ... канд. техн. наук (05.13.16) / Дмитрий Александрович Безик; Брянский государственный технический университет. - Брянск, 2000. - 131 с.
4. Балув Е.Д., Троянкин Ю.В. Влияние конструктивных параметров на аэродинамику циклонных камер // Теплоэнергетика. –1967. – №2. – С. 67-71.
5. Булгакова Н.Г., Яновский С.С. Методика графоаналитического расчета полной и фракционной эффективности пылеулавливающих аппаратов. // Механическая очистка газов. / Под ред. БФ. Подошевникова. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 66-68.
6. Карпов С.В. Влияние угла ввода потока на аэродинамику циклонно-вихревых камер / С. В. Карпов, Э.Н. Сабуров, В.В. Юницын, Ю.П. Опякин // Науч. тр. /АЛТИ. – 1971. – Вып. 39: Вопросы теплообмена и аэродинамики в пром. теплотехнике. – С. 3-10.

7. Польшковский Г.Б. Исследование влияния отношения диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона, расчет его сопротивления и повышение эффективности / Г.Б. Польшковский, И.Г.Бляхер, Л.Ф. Савицкая, Н.П. Михалёва // Тр. УНИХим. – 1982. – Вып. 54. – С. 16-20.
8. Карпухович Д.Т. Влияние относительной высоты цилиндрической части корпуса циклона на его технические характеристики // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1986. – №10. – С. 17-18.
9. Сабуров Э.Н. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Э.Н. Сабуров, С.В. Карлов. – М.: Экология, 1993. – 368 с.
10. Усманова Р.Р. Расчет основных факторов при оптимизации и проектировании аппаратов центробежной очистки газов / Р.Р. Усманова, Г.Е. Заиков // Энциклопедия инженера-химика. – 2013. – №2. – С. 26-33.

Сведения об авторах:

Безик Дмитрий Александрович – к.т.н., директор института энергетики и природопользования, Брянский ГАУ, с.Кокино;

Романев Николай Александрович – к.т.н., доцент кафедры технического сервиса, Брянский ГАУ, с.Кокино.

METHODOLOGY OF AUTOMATED CALCULATION OF CYCLONE PARAMETERS AND ITS PROGRAMME IMPLEMENTATION

Bezik D.A., Romaneev N.A.

Keywords: cyclone, dust collection, mathematical model, mathematical modeling, similarity criterion, process of centrifugal dust collection.

Abstract. The questions on cleaning of industrial emissions are given much attention to when creating and reconstructing enterprises. The cyclones dust cleaning are widely used for this purpose. The use of cyclones from the existing nomenclature does not always lead to the optimal solution. There are a number of studies devoted to predicting the characteristics of cyclones depending on their geometrical and operational parameters. Their use in CAD allows us to speed up the process of designing and optimizing cyclones for dust cleaning. On the basis of the calculated dependence analysis described in the literature, an algorithm has been compiled and a programme has been developed to automatically calculate the parameters of dust cleaning cyclones depending on their geometrical and operational parameters.

References

1. Varyvdin V.V. Use of computer programs in the design process technology for agriculture / V.V. Varyvdin, N.A. Romaneev, D.A. Bezik // Design, use and reliability of agricultural machines: collection of scientific papers. - Bryansk: Publishing house of Bryansk state agricultural Academy, 2011. - №1. P. 51-55.
2. Varyvdin V.V. Computer-aided design of machines in the process of improving the equipment for agriculture / V.V. Varyvdin, N.A. Romaneev, D.A. Bezik, M.M. Vasil'chenko // Design, use and reliability of agricultural machines: collection of scientific papers. - Bryansk: Publishing house of Bryansk state agricultural Academy, 2015. - №1. P. 114-119.
3. Bezik D.A. Automation of calculation of parameters of the cyclone based on the mathematical modeling of the dust: diss. ... cand. of techn. sciences (05.13.16) / Dmitriy Aleksandrovich Bezik; Bryansk state technical University. - Bryansk, 2000. - 131 p.
4. Baluev E.D., Troyankin Yu.V. Influence of design parameters on the aerodynamics of cyclone chambers // Heat power engineering. -1967. - №2. - P. 67-71.
5. Bulgakova N.G., Yanovskij S.S. Grapho-analytical method of calculation of full and fractional efficiency of dust removal devices. // Mechanical gas cleaning. - Moscow: Mechanical Engineering, 1987. – P. 66-68.

6. Karpov S.V. The Influence of angle of flow on the aerodynamics of cyclone-vortex chambers / S.V. Karpov, E.H. N. Saburov, V.V. Yunicyn, Yu.P. Opyakin // Scientific works /ALTI. - 1971. - Issue 39: Questions of heat transfer and aerodynamics in prom. thermotechnics. - P. 3-10.
7. Polykovskij G.B. Study of the influence of the ratio of the diameter of the exhaust pipe to the diameter of the cyclone, the calculation of its resistance and efficiency / G.B. Polykovskij, I.G. Blyaher, L.F. Savickaya, N.P. Mihalyova // Works of UNIChem. - 1982. - Issue 54. - P. 16-20.
8. Karpuhovich D.T. Influence of the relative height of the cylindrical part of the cyclone body on its technical characteristics // Chemical and petroleum engineering. - 1986. - №10. – P. 17-18.
9. Saburov E.N. Cyclone devices in woodworking and pulp and paper production / E.N. Saburov, S.V. Karlov. - Moscow: Ecology, 1993. - 368 p.
10. Usmanova R.R. Calculation of the main factors in the optimization and design of centrifugal gas cleaning devices / R.R. Usmanova, G.E. Zaikov // Encyclopedia of chemical engineer. - 2013. - №2. - P. 26-33.