

УДК 621.928

UDC 621.928

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

РАСЧЕТ ЦИКЛОННОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

CALCULATION OF A CYCLONE SEPARATOR FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Шаймухаметова Альбина Шамилевна
Ассистент
SPIN – код автора: 9252-4387
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Shaimukhametova Albina Shamilevna
Assistant lecturer
RSCI SPIN-code: 9252-4387
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Кулай Иван Геннадьевич
Аспирант
SPIN – код автора: 7319-6613
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Kulai Ivan Gennadevich
Postgraduate student
RSCI SPIN-code: 7319-6613
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Циклонные сепараторы широко применяются в агропромышленном комплексе для очистки вентиляционных и технологических выбросов от пыли. Однако повышение эффективности улавливания мелких частиц (тонкой пыли) остается актуальной задачей. В представленной работе выполнен расчет типового циклона для условий агропромышленного производства и проведен анализ его эффективности. Определены основные рабочие показатели аппарата: эффективность очистки воздушного потока от пыли и гидравлическое сопротивление. Для расчетов использованы известные теоретические зависимости и полуэмпирические формулы: определены степень очистки воздуха, характеристический «отрезной» размер частиц и потери давления при разных режимах работы циклона. Показано, что увеличение скорости входящего воздуха существенно повышает эффективность сепарации (например, суммарная эффективность возрастает с 78% до 90% при росте скорости с 12 до 18 м/с), однако сопровождается возрастанием перепада давления (с 600 Па до 1350 Па). Установлено, что при увеличении концентрации пыли на входе (с 1 до 5 г/м³) эффективность циклона снижается незначительно (примерно на 2%) и это практически не влияет на сопротивление. Сделан вывод, что решающим фактором эффективности циклона является аэродинамический режим (скорость потока), и для достижения высокой степени очистки необходимо поддерживать интенсивное закручивание воздуха, не допуская при этом чрезмерного роста энергозатрат. Стандартный циклонный пылеуловитель способен обеспечить около 80–90% очистки воздуха от типичной для АПК пыли,

Cyclone separators are widely used in the agro-industrial complex for cleaning ventilation and technological emissions from dust. However, improving the efficiency of fine particle (fine dust) capture remains a relevant challenge. This study presents the calculation of a typical cyclone separator for agro-industrial conditions and analyzes its efficiency. The main operational parameters of the apparatus were determined, including air purification efficiency and hydraulic resistance. The calculations were based on well-known theoretical dependencies and semi-empirical formulas, which allowed for determining the air purification degree, the characteristic "cut-off" particle size, and pressure losses under different operating conditions of the cyclone. It was shown that an increase in the inlet air velocity significantly enhances separation efficiency (for example, the total efficiency increases from 78% to 90% when the velocity rises from 12 to 18 m/s). However, this is accompanied by an increase in pressure drop (from 600 Pa to 1350 Pa). It was found that an increase in dust concentration at the inlet (from 1 to 5 g/m³) results in only a slight decrease in cyclone efficiency (by approximately 2%) and has almost no effect on resistance. It was concluded that the key factor influencing cyclone efficiency is the aerodynamic regime (flow velocity), and to achieve a high level of purification, it is necessary to maintain intensive air swirling while avoiding excessive energy consumption. A standard cyclone dust collector can provide about 80–90% air purification from typical dust found in the agro-industrial complex. However, additional purification measures may be required for capturing finer fractions (less than 10 μm)

однако для улавливания более мелких фракций (менее 10 мкм) могут потребоваться дополнительные меры очистки

Ключевые слова: ЦИКЛОННЫЙ СЕПАРАТОР, ОЧИСТКА ВОЗДУХА, ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ, ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС

Keywords: CYCLONE SEPARATOR, AIR PURIFICATION, DUST COLLECTION, SEPARATION EFFICIENCY, HYDRAULIC RESISTANCE, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-018>

Введение. Агропромышленный комплекс включает множество производственных процессов, сопровождающихся образованием значительных объемов пыли и твердых примесей в воздухе. При переработке и хранении сельскохозяйственной продукции – например, в зерновом хозяйстве, комбикормовом производстве, мукомольной и пищевой промышленности – в воздух поступают мелкие частицы органического происхождения (зерновая пыль, шелуха, мука, дробленый корм и др.). Если не осуществлять эффективную очистку, пылевые выбросы приводят к загрязнению воздуха, ухудшают условия труда и санитарную обстановку, а также создают угрозу взрывоопасности мелкодисперсной пыли. Циклонные сепараторы являются одним из наиболее распространенных видов оборудования для очистки воздуха от пыли в АПК. Принцип их работы основан на инерционно-вихревом разделении: запыленный воздух закручивается внутри корпуса циклона, благодаря чему твердые частицы под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам и осаждаются в бункер, а очищенный воздух выводится через центральный вытяжной патрубок. Такие аппараты не имеют движущихся частей, отличаются простотой конструкции и надежностью, способны перерабатывать большие объемы воздуха с высокой пылевой нагрузкой. В различных отраслях АПК циклонные пылеуловители применяются для улавливания пыли на самых разных этапах технологического процесса. Например, на зерноочистительных и зерноперерабатывающих предприятиях циклоны устанавливаются в

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/18.pdf>

аспирационных системах элеваторов, норий, зерносушилок, сортировочных машин, мельниц для муки и круп. В комбикормовом производстве циклонные фильтры улавливают пыль измельченного сырья и готовых кормов в смесителях, дробилках и грануляторах. Также циклонные сепараторы могут использоваться в животноводческих хозяйствах для очистки вентиляционного воздуха от пылевых частиц кормов и подстилки. При этом они особенно эффективны для улавливания крупнодисперсной и средней по размеру пыли (примерно свыше 10–20 мкм), тогда как более мелкие частицы частично уносятся с очищенным воздухом. Тем не менее, благодаря универсальности и низким эксплуатационным затратам, циклоны сохраняют ключевые позиции в системах пылеочистки агропредприятий.

Циклонные сепараторы применяются не только для очистки воздуха внутри производственных помещений, но и в технологических процессах, связанных с транспортировкой и переработкой сыпучих материалов. Например, в зернохранилищах и комбикормовых заводах они используются в системах аспирации, предотвращая отложение пыли в вентиляционных каналах и уменьшая риск загрязнения готовой продукции. В животноводческих комплексах циклонные пылеуловители применяются в системах удаления твердых аэрозолей, образующихся при переработке кормов и биологических отходов. Использование циклонов в таких условиях позволяет существенно повысить безопасность производственных процессов, улучшить качество продукции и продлить срок службы оборудования [1].

В современных системах пылеулавливания активно внедряются комбинированные технологии, объединяющие циклонные аппараты с другими методами очистки. Например, предварительное отделение крупных частиц в циклоне позволяет снизить нагрузку на более тонкие фильтрующие элементы, такие как электростатические или рукавные

фильтры. Такой подход не только повышает общую эффективность очистки воздушных потоков, но и снижает эксплуатационные затраты за счет увеличения ресурса работы фильтров и уменьшения энергопотребления.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Циклонные пылеуловители исследуются уже многие десятилетия, и накоплен значительный объем научных данных по их работе. Разработаны полуэмпирические модели и методики, позволяющие прогнозировать эффективность улавливания частиц разных размеров и гидравлическое сопротивление циклона. Сформулированы базовые уравнения для расчета ключевых параметров, например, для определения предельного («отрезного») диаметра частиц, осаждаемых с заданной эффективностью. Современные исследования активно применяют компьютерное моделирование (CFD) для анализа газового потока и траекторий частиц внутри циклона.

Несмотря на обилие исследований, проблема очистки воздушных потоков в АПК остается актуальной. Пылевые выбросы от переработки сельхозпродукции зачастую содержат значительную долю тонкодисперсных частиц, улавливание которых стандартными циклонами затруднено. В условиях ужесточения санитарно-гигиенических норм и экологических требований к качеству воздуха существующие технологии нуждаются в повышении эффективности. Необходимо обеспечивать улавливание даже мелкой пыли (например, мукомольной или комбикормовой) и снижать концентрацию выбросов до нормативных значений. Одновременно важно ограничивать энергозатраты: пылеочистительные системы должны достигать высокой эффективности без чрезмерного роста аэродинамического сопротивления, так как увеличение сопротивления требует большей мощности вентилятора.

Одно из направлений современных разработок – совершенствование конструкции циклонных сепараторов для повышения их эффективности. Изучаются новые конфигурации аппаратов: удлиненные цилиндрические и конические корпуса, применение батарейных циклонов (группы малых циклонов, работающих параллельно), установка направляющих лопаток на входе, оптимизация отвода очищенного воздуха через выхлопную трубу и другие технические решения. Например, уменьшение диаметра циклона или увеличение его высоты увеличивает время пребывания частиц в зоне действия центробежных сил, что улучшает улавливание мелких фракций, но сопровождается ростом сопротивления. Поэтому ведется поиск баланса между эффективностью сепарации и потерями давления. Также рассматривается комбинирование циклонов с другими методами (например, последовательная очистка сначала в циклоне, затем в рукавном фильтре) для улавливания наиболее тонкой пыли. Необходимость повышения эффективности существующих технологий очевидна и служит стимулом для дальнейших исследований в этой области.

Цель исследований. Цель настоящей работы заключается в проведении расчетов циклонного сепаратора и анализе его эффективности в условиях агропромышленного комплекса. Предполагается определить основные рабочие характеристики циклона (эффективность очистки воздуха от пыли, гидравлическое сопротивление и др.) и оценить их изменение при различных условиях эксплуатации (концентрация пыли на входе, скорость воздушного потока).

Материалы и методы исследований.

Для анализа выбран типовой циклонный сепаратор цилиндрикоконической формы, широко используемый в АПК. Геометрические пропорции аппарата соответствуют стандартной конструкции серии ЦН-15 (диаметр цилиндрической части около 0,5 м). Пыль считается сухой, неслипающейся, органического происхождения

(например, зерновая или комбикормовая) с плотностью частиц 1500 кг/м^3 . Расчеты проводились для воздуха при нормальных условиях, где плотность воздуха составляет $1,2 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Эффективность очистки воздуха от пыли определяется как отношение разности концентраций пыли на входе $C_{\text{вх}}$ и выходе $C_{\text{вых}}$ к входной концентрации, выраженное в процентах:

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} 100\%., \quad (1)$$

Для описания фракционной эффективности η_d , т. е. зависимости степени улавливания от диаметра частиц d , используется логистическая кривая. Она характеризуется диаметром отсечки d_{50} , который соответствует частице, улавливаемой с вероятностью 50 %, и показателем крутизны n , составляющим около 2.

$$\eta_d = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d}\right)^n}, \quad (2)$$

Диаметр отсечки d_{50} рассчитывается по формуле Лэпла:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi N_e (\rho_p - \rho_v) u_{\text{вх}}}}, \quad (3)$$

где b – ширина входного окна циклона, м; N_e – эффективное число оборотов потока, шт.; $u_{\text{вх}}$ – скорость на входе, м/с.

Формула (3) позволяет оценить минимальный размер частиц, которые могут быть эффективно улавливаемы данным циклоном.

Потери давления в циклоне Δp определяются по выражению (4):

$$\Delta p = \xi \frac{\rho_v u_{\text{вх}}^2}{2}, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент сопротивления циклона (для типовых моделей составляет в диапазоне 6-10).

Результаты исследований.

На основе проведённых расчётов выявлены закономерности изменения эффективности пылеулавливания и гидравлического сопротивления циклонного сепаратора в зависимости от скорости воздушного потока и концентрации пылевых частиц. Основные результаты анализа и количественные показатели представлены в таблице 1.

С увеличением скорости воздуха на входе в циклонную камеру возрастает эффективность пылеулавливания. Это связано с тем, что при высокой скорости усиливаются центробежные силы, которые эффективнее отбрасывают частицы к стенкам аппарата, способствуя их осаждению в бункере. Однако, одновременно с этим увеличивается и аэродинамическое сопротивление циклона, что требует большей мощности вентиляционной системы.

Повышение начальной концентрации пыли в воздушном потоке слабо влияет на общую эффективность улавливания частиц.

Таблица 1 – Расчетные значения

Скорость воздуха $u_{вх}$, м/с	Эффективность очистки η , % (при концентрации 1 г/м ³)	Эффективность очистки η , % (при концентрации 5 г/м ³)	Потери давления Δp , Па (при концентрации 1 г/м ³)	Потери давления Δp , Па (при концентрации 5 г/м ³)
12	78	75	600	620
15	85	83	950	980
18	90	88	1350	1400

При увеличении скорости входного воздуха с 12 м/с до 18 м/с эффективность улавливания пыли возрастает с 78% до 90% при запыленности 1 г/м³. В случае более высокой запыленности воздуха (5

г/м³) эффективность оказывается несколько ниже, изменяясь с 75% до 88%. Это связано с тем, что при высокой концентрации пылевых частиц возможно их повторное вовлечение в воздушный поток, что снижает общую степень очистки.

С увеличением скорости воздушного потока возрастает и гидравлическое сопротивление сепаратора. Если при скорости 12 м/с оно составляет 600 Па, то при 18 м/с достигает 1350 Па. При высокой концентрации пыли (5 г/м³) сопротивление возрастает незначительно – на 20–50 Па. Это объясняется тем, что дополнительное количество пылевых частиц оказывает сравнительно небольшое влияние на аэродинамическое сопротивление воздушного потока внутри циклона.

Выводы. 1. Циклонные сепараторы подтверждают свою эффективность как надежное средство очистки воздуха от пыли в агропромышленном комплексе, позволяя улавливать большую часть крупнодисперсных примесей и снижать запыленность производственных помещений. 2. В диапазоне исследованных условий изменение концентрации пыли в воздухе (от 1 до 5 г/м³) оказывает сравнительно небольшое влияние на эффективность сепарации и практически не влияет на перепад давления. Небольшое снижение эффективности при высокой пылевой нагрузке связано с возможным повторным уносом части осевших частиц.

Библиографический список

1. Salakhova, E. I. Modeling of Erosion in a Cyclone and a Novel Separator with Arc-Shaped Elements / E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. I. Salakhov // Processes. – 2023. – V. 11. - № 1. – P. 156.

References

1. Salakhova, E. I. Modeling of Erosion in a Cyclone and a Novel Separator with Arc-Shaped Elements / E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. I. Salakhov // Processes. – 2023. – V. 11. - № 1. – P. 156.