

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ КРАХМАЛИСТОГО СЫРЬЯ

В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Р.Р. Мубаракшина

Одной из наиболее важных задач пищевых производств является повышение эффективности очистки газовых потоков от твердых частиц размером менее 20 мкм. В работе рассмотрены различные аппараты для решения данной задачи и отмечено, что существующие модели наиболее распространенных аппаратов для очистки газов от твердых частиц – циклоны – имеют малую эффективность при очистке газа от частиц размером менее 10–20 мкм. Предложена разработанная авторами конструкция сепарационного устройства с двутавровыми элементами, позволяющая очищать газовые потоки от частиц размером менее 20 мкм с эффективностью не менее 64 %. Описан принцип действия устройства. Приведены результаты численного моделирования процесса очистки газового потока от твердых частиц размером от 5 до 20 мкм плотностью 1000–7000 кг/м³ при входной скорости газа от 3 до 15 м/с. Показано, что для разработанной конструкции сепарационного устройства с двутавровыми элементами для достижения максимальной эффективности очистки газа от частиц пыли размером более 5 мкм и плотностью 1000 кг/м³ и более оптимальными входными скоростями газового потока являются 15 м/с и выше. При размере частиц 5 мкм и их плотностью 1000 кг/м³ наиболее оптимальным диапазоном входных скоростей газового потока является до 10 м/с.

Ключевые слова: очистка газа, циклон, сепаратор, пылеулавливание, твердые частицы, пыль, мелкодисперсные частицы, эффективность, степень очистки, пылесадительная камера, циклонный сепаратор.

Важной задачей в сфере агропромышленного комплекса является повышение эффективности очистки газовых потоков от частиц пыли размером менее 20 мкм. В частности, на предприятиях пищевой промышленности большинство технологических процессов связаны с выделением в окружающую среду пыли, которая вследствие своего технологического происхождения представляет опасность для работников предприятий.

Пыль пищевых производств весьма разнообразна по химическому составу, размеру частиц, их форме, характеру краев частиц, плотности и др. параметров. Вследствие малых размеров менее 10 мкм частицы пыли практически постоянно витают в воздухе и способны проникать в органы дыхания работников на предприятиях. Следует отметить, что более крупные частицы при их осаждении на технологическое оборудование ухудшают его работу и могут привести к возникновению аварийных ситуаций. Также многие пыли пищевых производств, например, сахарная, крахмальная и др., могут образовывать взрывоопасные смеси. Поэтому повышение эффективности очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц пыли является актуальной задачей для предприятий пищевой промышленности [1–4].

В настоящее время очистка газовых потоков от частиц пыли пищевых производств осуществляется различными аппаратами – циклонами, пылесадительными камерами и др. Среди них наиболее широкое распространение получили циклонные аппараты, вследствие простоты их устройств, надежности в эксплуатации при сравнительно небольших капитальных затратах, работы при высоких температурах и давлениях. Основными моделями циклонов, используемых на предприятиях пищевой промышленности, являются ЦН-11, ЦН-15, ЦКФ-450, УЦ-38-850, УЦМ-38-850 и др. Выбор определенной модели циклона зависит от многих факторов: требуемая производительность, плотность и размер частиц пыли, запыленность газового потока и др. Однако главными недостатками циклонов являются низкая эффективность очистки газовых потоков от частиц пыли размером менее 10–20 мкм в зависимости от модели аппарата, высокие потери давления и износ твердых поверхностей циклона, вследствие механического воздействия запыленного газового потока на них. Поэтому разработка новых видов аппаратов для повышения эффективности очистки газов от частиц пыли размером менее 10–20 мкм является важной задачей для предприятий пищевой промышленности [5–8].

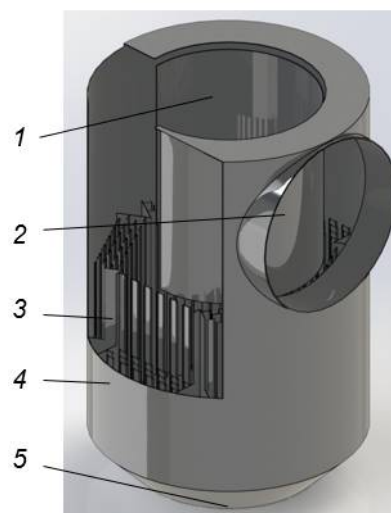
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ КРАХМАЛИСТОГО СЫРЬЯ

Авторами данной работы была разработана конструкция сепарационного устройства с двутавровыми элементами для очистки газовых потоков от мелко-, средне- и крупнодисперсной пыли. Сепарационное устройство представляет собой цилиндрический корпус 4 с входным 1 и выходным 2 патрубками для подачи запыленного потока в устройства и выходы очищенного газа из него соответственно и выходным патрубком для пылевого бункера 5. Внутри устройства располагается 6 секций двутавровых элементов 3. Принцип работы устройства можно описать следующим образом: запыленный газовый поток входит в сепарационное устройство через входной патрубок 1, после чего движется в нижнюю часть устройства по трубе, далее запыленный поток изменяет свое направление перпендикулярно трубе и проходит через секции двутавровых элементов 3, при обтекании которых возникают центробежные силы, смещающие частицы пыли в направлении твердых поверхностей, далее очищенный газовый поток направляется к выходному патрубку 2. При этом частицы пыли седиментируют в пылевой бункер через выходной патрубок 5. Мелкодисперсные частицы размером до 10 мкм прилипают к поверхностям двутавровых элементов за счет возникновения электростатических сил, броуновского движения и межмолекулярных сил. Также двутавровые элементы выступают в качестве агломераторов, способствующих коагуляции мелких частиц друг с другом, в результате которой образуются более крупные соединения частиц, которые наиболее подвержены седиментации в устройстве. Таким образом, очистка газового потока от частиц пыли осуществляется за счет инерционного осаждения при резком изменении направления движения запыленного потока из внутренней трубы к секциям двутавровых элементов 3 и центробежных сил, возникающих при обтекании газом сепарационных элементов (рисунок 1).

Каждая секция двутавровых элементов 3 включает несколько рядов двутавров, которые расположены относительно друг друга на расстоянии L , определяющемся по формуле (1), и позволяющем расположить двутавровые элементы таким образом, чтобы достигались максимальные значения центробежных сил при их обтекании запыленным газовым потоком, что способствует повышению эффективности сепарационного устройства [9–11].

$$L = \frac{h_1 + b}{2}, \quad (1)$$

где h_1 – длина выступа двутаврового элемента, м; b – длина двутаврового элемента, м.



1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок; 3 – секция двутавровых элементов; 4 – цилиндрический корпус; 5 – выходной патрубок для пылевого бункера

Рисунок 1 – Трехмерная модель сепарационного устройства с двутавровыми элементами (вид с разрезом)

Целью данной работы является численное моделирование процесса улавливания твердых частиц пыли размером менее 20 мкм в сепарационном устройстве.

Исследование проводилось путем численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent. В ходе исследования была построена трехмерная модель сепарационного устройства, представленного на рисунке 1, и были заданы следующие граничные условия: на входе в устройство задавалась скорость газового потока, которая варьировалась от 3 до 15 м/с, на выходе из устройства задавалось атмосферное давление равное 101 325 Па. Температура окружающей среды принималась равной 20 °С. Трехмерная модель сепарационного устройства имела следующие геометрические размеры: высота устройства – 680 мм, диаметр цилиндрического корпуса – 450 мм, диаметр входного и выходного патрубков – 300 мм, диаметр внутренней трубы – 310 мм, диаметр выходного патрубка для пылевого бункера – 300 мм, длина выступа двутаврового элемента – 3,5 мм, длина и толщина двутаврового элемента – 14 и 0,4 мм соответственно. Каждая секция включала 4 ряда по 6 двутавровых элементов. На всех твердых поверхно-

стях сепарационного устройства задавались условия отскакивания частиц пыли, кроме поверхности выходного патрубка для пылевого бункера 5 (рисунок 1), на данной поверхности задавалось условие прилипания, т. к. считалось, что частицы при непосредственном контакте с ней оседают в бункере и, соответственно, улавливаются. Также принимались следующие допущения: процесс течения газового потока стационарен, концентрация пыли исключает взаимодействие между частицами, влияние частиц на движение несущей среды не учитывается. Для оценки улавливания твердых частиц пыли сепарационным устройством в газовом потоке задавалось определенное количество частиц $n = 1000$, плотность ρ_a которых варьировались от 1000 до 7000 кг/м³ и размер которых изменялся от 5 до 20 мкм.

Эффективность сепарационного устройства рассчитывалась по следующей формуле:

$$E = 1 - \frac{n_k}{n}, \quad (2)$$

где n_k – число твердых частиц пыли, уловленных сепарационным устройством.

Результаты проведенных исследований представлены в графическом виде на рисунках 2–4. Рост входной скорости приводил к повышению эффективности очистки газового потока от твердых частиц пыли размером 5–20 мкм за счет увеличения центробежной силы, которая возникала между рядами двутавровых элементов при их обтекании запыленным газовым потоком. По мере увеличения входной скорости от 3 до 15 м/с эффективность очистки газа от частиц пыли плотностью 1000–7000 кг/м³ в среднем увеличивалась на 11,1 %. При этом эффективность сепарационного устройства для данных диапазонов скорости потока и плотности частиц составляла в среднем 77,1 %. Большое влияние на очистку газа от частиц пыли имела плотность диспергированных частиц пыли в газовом потоке – чем больше ее значение, тем легче частицы выбивались из структурированного движения потока в сепарационном устройстве. Это объясняется тем, что частицы с большей плотностью наиболее подвержены выбиванию из потока при его движении по непрямолинейному участку, тем частицы с меньшей плотностью. Также при более высокой плотности увеличивается вес частиц, следовательно, седиментируют такие частицы в пылевой бункер быстрее. Проведенные исследования показали, что при увеличении плотности твердых частиц от 1000 до 7000 кг/м³, диспергированных в газовом

потоке, эффективность сепарационного устройства повышалась на 13,7 и 15,7 % при скорости газа 7 и 15 м/с соответственно.

В ходе исследований было установлено, что потери давления в устройстве составляли не более 1590 Па.

Эффективность очистки газового потока при его входной скорости в диапазоне 3–15 м/с от твердых частиц пыли размером 5–20 мкм и плотностью 1000 кг/м³ составляла в среднем 70,5 %. При скорости газового потока 3, 7, 10, 12 и 15 м/с эффективность сепарационного устройства для частиц плотностью 1000 кг/м³ в среднем составляла 66,2, 69,1, 71,5, 72,6 и 73,2 % соответственно. Для частиц размером 5, 10, 15 и 20 мкм при их плотности 1000 кг/м³ и скорости газового потока в диапазоне 3–15 м/с эффективность в среднем составляла 64,9, 67,7, 72,4 и 77,1 % соответственно. Следует отметить, что эффективность сепарационного устройства с двутавровыми элементами при очистке газа от частиц размером 5 мкм и плотностью 1000 кг/м³ возрастала при скорости газового потока от 3 до 10 м/с в среднем на 5,4 %, после увеличения скорости газа до 10 м/с и более эффективность устройства уменьшалась, вследствие появления дополнительных вихреобразований, нарушающих структуру потока. При возникновении новых точек вихреобразования трудноулавливаемые частицы с малой плотностью и малым размером подхватывались повторно газовым потоком, после их выбивания из структуры потока по мере огибания газом секции двутавровых элементов (рисунок 2).

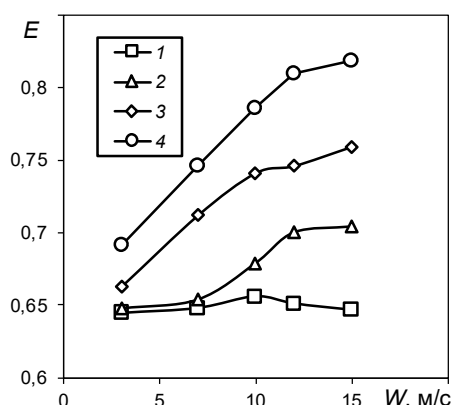


Рисунок 2 – Зависимость изменения эффективности очистки газового потока от твердых частиц пыли сепарационном устройством от входной скорости газа при их различном размере, мкм: 1–5, 2–10, 3–15, 4–20. Плотность твердых частиц задавалась 1000 кг/м³

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ КРАХМАЛИСТОГО СЫРЬЯ

При плотности твердых частиц 3000 кг/м^3 и скорости газового потока от 3 до 15 м/с эффективность сепарационного устройства составляла в среднем 77,1 %. При скорости газового потока 3, 7, 10, 12 и 15 м/с эффективность устройства для частиц плотностью 3000 кг/м^3 в среднем составляла 70,3, 75,4, 78,1, 79,9, 81,4 % соответственно. Увеличение плотности частиц от 1000 до 3000 кг/м^3 показало, что возникновение дополнительных точек вихреобразования, вследствие роста входной скорости газового потока, оказывало меньшее влияние на повторное подхватывание частиц размером 5 мкм газовым потоком – рост эффективности при скорости газового потока от 3 до 15 м/с составил 3,6 % (рисунок 2).

Для частиц размером 10, 15 и 20 мкм при их плотности 1000 кг/м^3 и скорости газового потока в диапазоне 3–15 м/с эффективность в среднем составляла 75,1, 81,1 и 85,9 % соответственно. Эффективность очистки газа от частиц размером 20 мкм при его скорости 15 м/с составила 93,1 % (рисунок 3).

Эффективность очистки газового потока при его входной скорости в диапазоне 3–15 м/с от твердых частиц пыли размером 5–20 мкм и плотностью 7000 кг/м^3 составляла в среднем 83,8 %. При скорости газового потока 3, 7, 10, 12 и 15 м/с эффективность сепарационного устройства для частиц плотностью 7000 кг/м^3 в среднем составляла 73,3, 82,7, 86,6, 87,4 и 88,9 % соответственно. Для частиц размером 5, 10, 15 и 20 мкм при их плотности 7000 кг/м^3 и скорости газового потока в диапазоне 3–15 м/с эффективность в среднем составляла 71,2, 81,9, 89,3 и 92,7 % соответственно (рисунок 4).

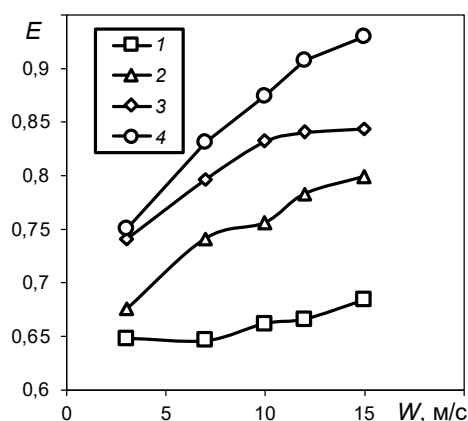


Рисунок 3 – Зависимость изменения эффективности очистки газового потока от твердых частиц пыли сепарационном устройством от входной скорости газа при их различном размере, мкм: 1–5, 2–10, 3–15, 4–20. Плотность твердых частиц задавалась 3000 кг/м^3

Следует отметить, что на более тяжелые частицы плотностью 7000 кг/м^3 при их размере 5 мкм возникновение дополнительных точек вихреобразования по мере роста скорости газового потока оказывало еще меньшее влияние, чем для частиц плотностью 1000 кг/м^3 (рисунок 2) и плотностью 3000 кг/м^3 (рисунок 3).

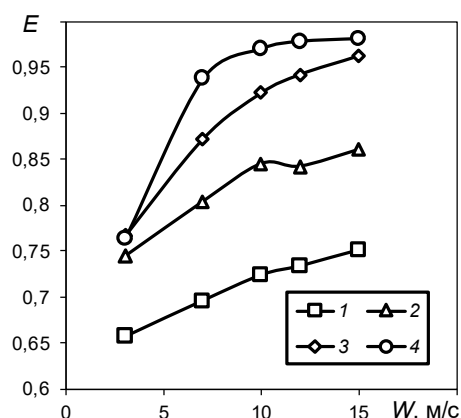


Рисунок 4 – Зависимость изменения эффективности очистки газового потока от твердых частиц пыли сепарационном устройством от входной скорости газа при их различном размере, мкм: 1–5, 2–10, 3–15, 4–20. Плотность твердых частиц задавалась 7000 кг/м^3

При скорости газового потока 15 м/с и размере частиц 20 мкм эффективность устройства составляла 98,2 % (рисунок 4).

Таким образом, проведенные исследования показали, что на эффективность очистки газового потока от твердых частиц существенное влияние оказывают: плотность и размер частиц, входная скорость газового потока – чем большее значение эти величины имеют, тем выше эффективность устройства. Однако при входных скоростях газового потока более 10 м/с в устройстве возникают новые точки вихреобразования, способствующие повторному подхватыванию частиц пыли малых размеров и малой плотностью. В частности, это отчетливо прослеживается по линии 4 на рисунке 2 для диапазона скорости газа от 10 м/с. Поэтому выбор оптимальной нагнетаемой входной скорости газового потока компрессором на предприятии необходимо подбирать, учитывая дисперсность пыли в газе. В ходе исследований было установлено, что для разработанной конструкции сепарационного устройства с двутавровыми элементами для достижения максимальной эффективности очистки газа от частиц пыли размером более 5 мкм и плотностью 1000 кг/м^3 и более оптимальными входными

скоростями газового потока являются 15 м/с и выше. При размере частиц 5 мкм и их плотностью 1000 кг/м³ наиболее оптимальным диапазоном входных скоростей газового потока является до 10 м/с.

Проведенные исследования показали, что разработанная конструкция сепарационного устройства имеет практическую значимость. Данное устройство может быть расположено до сепарационных циклонов, что позволит существенно повысить эффективность очистки газа от твердых частиц размером менее 20 мкм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК - 616.2020.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возмилов, А.Г. Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в технологических процессах АПК / А.Г. Возмилов, О.В. Звездакова // Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. – 2013. – Т. 66. – С. 14–24.

2. Небытов, В.Г. Влияние загрязненности пылью воздуха рабочей зоны на условия труда работников в сельском хозяйстве / В.Г. Небытов, Ю.В. Кошечкин, С.Н. Барабанова // Агротехника и энергообеспечение. – 2015. – № 3 (7). – С. 191–196.

3. Дмитриев, А.В. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах / А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ву Линь Нгуен // Вестник Иркутского технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 3 (134). – С. 138–144.

4. Асламова, В.С. Оптимальное проектирование прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли / В.С. Асламова, И.М. Кулакова, А.А. Жабей // Вестник ангарской государственной технической академии. – 2009. – Т. 3. – С. 14–15.

5. Хмелев, В.Н. Усовершенствованная конструкция циклона для очистки промышленных газов от дисперсных примесей / В.Н. Хмелев, А.В. Ша-

лунов, К.В. Шалунова // Позуновский вестник. – 2009. – № 3. – С. 104–106.

6. Алексеев, В.В. Повышение эффективности пылеулавливания циклонов в производстве сухой молочной сыворотки / В.В. Алексеев, И.И. Поникаров // Вестник казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 6. – С. 14–15.

7. Беляев, Е.Н. Исследование модели прямоточного батарейного циклона со взаимодействующими потоками / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк // Позуновский вестник. – 2009. – № 1–2. – С. 293–297.

8. Кузьмин, В.В. К выбору оптимального типа циклона / В.В. Кузьмин, Е.А. Ходик // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. – 2014. – № 5–3. – С. 80–83.

9. Дмитриев, А.В. Влияние конструктивного оформления элементов прямоугольного сепаратора на эффективность очистки газа от твердых частиц / А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 9. – С. 58–61.

10. Дмитриев, А.В. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами / А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ву Линь Нгуен // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 15. – С. 78–80.

11. Зинуров, В.Э. Исследование очистки газового потока от различных фракций пылевидных частиц сепаратором трапециевидной формы / В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, М.О. Уткин // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22. – № 10. – С. 68–71.

Зинуров Вадим Эдуардович, аспирант, ФГБОУ ВО «КГЭУ», кафедра «Теоретические основы теплотехники», vadd_93@mail.ru.

Дмитриев Андрей Владимирович, д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «КГЭУ», кафедра «Теоретические основы теплотехники», ieremiada@gmail.com.

Мубаракшина Рузиля Радиковна, студент, ФГБОУ ВО «КГЭУ», кафедра «Экономика и организация производства», ru-zilya.mubarakshin.01@mail.ru.