

УДК 631.362

UDC 631.362

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)

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИВИХРЕВОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ АСПИРАЦИОННОГО ВОЗДУХА ЗЕРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

CALCULATION-BASED ASSESSMENT OF THE APPLICATION OF A MULTI-VORTEX SEPARATOR FOR PURIFICATION OF ASPIRATION AIR IN GRAIN-PROCESSING FACILITIES

Семенычев Павел Андреевич
Нижекамский химико-технологический институт, Нижнекамск, Россия

Semenychev Pavel Andreevich
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology, Nizhnekamsk, Russia

Хусаинов Раиль Камилевич
Канд. техн. наук, доцент
Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

Khusainov Rail Kamilevich
Candidate of Technical Sciences, docent
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

Зинурова Карина Ирековна
Магистрант
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Zinurova Karina Irekovna
Master's Degree student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Повышение эффективности очистки аспирационного воздуха зерноперерабатывающих производств при одновременном ограничении энергетических затрат на работу вентиляционных систем является актуальной задачей. В статье рассмотрена возможность применения мультивихревого сепаратора в качестве ступени предварительного обеспыливания перед фильтрующим оборудованием. Объектом расчетной оценки являлся запыленный воздушный поток, содержащий частицы зерновой пыли размером от 1 до 100 мкм. Рассмотрены три характерных скоростных режима движения воздуха в рабочей зоне аппарата: 6, 9 и 12 м/с. На основе расчетно-модельного анализа построены зависимости фракционной эффективности улавливания частиц и гидравлического сопротивления аппарата. Показано, что увеличение скорости воздушного потока способствует смещению кривой эффективности в область меньших размеров частиц, однако сопровождается ростом аэродинамических потерь. Установлено, что наиболее рациональным для предварительной очистки является диапазон скоростей 9–12 м/с, обеспечивающий компромисс между степенью улавливания пыли и сопротивлением аппарата. Отмечено, что мультивихревая структура потока позволяет интенсифицировать инерционное отклонение частиц без существенного усложнения конструкции. Практическая значимость работы

Improving the efficiency of aspiration air purification in grain-processing facilities while limiting the energy consumption of ventilation systems is an urgent engineering problem. The article considers the possibility of using a multi-vortex separator as a preliminary dust-removal stage upstream of filtering equipment. The object of the calculation-based assessment was a dust-laden air flow containing grain dust particles ranging from 1 to 100 μm in size. Three characteristic air velocity regimes in the working zone of the apparatus were considered: 6, 9, and 12 m/s. Based on calculation and model analysis, dependences of the fractional particle collection efficiency and hydraulic resistance of the apparatus were obtained. It is shown that an increase in air flow velocity shifts the efficiency curve toward smaller particle sizes; however, this is accompanied by an increase in aerodynamic losses. It was established that the most rational velocity range for preliminary purification is 9–12 m/s, providing a compromise between dust collection efficiency and apparatus resistance. It is noted that the multi-vortex flow structure makes it possible to intensify the inertial deviation of particles without significantly complicating the design. The practical significance of the work is associated with the possibility of adapting such an apparatus to existing aspiration lines at agro-industrial facilities

связана с возможностью адаптации такого аппарата к действующим аспирационным линиям предприятий агропромышленного комплекса

Ключевые слова: МУЛЬТИВИХРЕВОЙ СЕПАРАТОР, ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЧИСТКА; ФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ИНЕРЦИОННОЕ УЛАВЛИВАНИЕ, АСПИРАЦИОННАЯ СИСТЕМА, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС

Keywords: MULTI-VORTEX SEPARATOR, PRELIMINARY PURIFICATION, FRACTIONAL EFFICIENCY, HYDRAULIC RESISTANCE, INERTIAL COLLECTION, ASPIRATION SYSTEM, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-219-051>

Введение. Зерноперерабатывающие производства относятся к числу технологических объектов агропромышленного комплекса, для которых характерно постоянное образование пылевоздушных потоков. Источниками дисперсных загрязнений являются операции приемки, транспортирования, очистки, сушки, измельчения, дозирования и фасовки зерна и продуктов его переработки. Образующаяся пыль ухудшает санитарно-гигиенические условия труда, повышает нагрузку на аспирационные установки, способствует загрязнению оборудования и может создавать пожаро- и взрывоопасные условия. Поэтому повышение эффективности очистки аспирационного воздуха является важной инженерной задачей для зерноочистительных, мукомольных и комбикормовых предприятий.

В традиционных системах обеспыливания широко применяются циклонные аппараты, рукавные и кассетные фильтры. Циклоны отличаются простотой конструкции и устойчивостью к эксплуатации, однако их эффективность при улавливании мелкодисперсных частиц ограничена. Фильтрующие аппараты обеспечивают более высокую степень очистки, но сопровождаются ростом гидравлического сопротивления по мере накопления пылевого слоя. Это увеличивает энергопотребление вентиляторов и требует регулярного обслуживания.

Одним из возможных направлений совершенствования аспирационных систем является применение компактных инерционно-

<http://ej.kubagro.ru/2026/05/pdf/51.pdf>

вихревых аппаратов предварительной очистки. В таких устройствах сепарация частиц осуществляется за счет многократного изменения направления потока, формирования локальных вихревых зон и действия инерционных сил. Мультивихревой сепаратор может рассматриваться как промежуточное решение между циклоном и фильтром: он не заменяет тонкую фильтрацию, но способен снизить пылевую нагрузку на последующие ступени очистки. В настоящей работе выполнена расчетная оценка его применения для условий зерноперерабатывающего производства.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Проблема пылеобразования при обращении с растительным сырьем и продуктами его переработки имеет комплексный характер. При механическом воздействии на зерно, солому, травяную массу и другие биологические материалы образуется полидисперсная пыль, включающая органические частицы различного размера. В статье [1] показано, что процессы транспортирования, измельчения, сушки и гранулирования биомассы сопровождаются генерацией пыли и мелких частиц, что требует учета как технологических, так и эксплуатационно-безопасностных факторов.

Для очистки промышленных газов и аспирационного воздуха в течение длительного времени применяются центробежные аппараты. Их расчет обычно связан с оценкой гидродинамической структуры закрученного потока, перепада давления и фракционной эффективности улавливания. В статье [2] обобщены подходы к моделированию газового и дисперсного потоков в циклонах, включая расчет поля скоростей, давления и эффективности сепарации. Вместе с тем классические циклонные аппараты не всегда рациональны для малогабаритных аспирационных систем, где требуются компактность, умеренное сопротивление и возможность размещения оборудования в ограниченном пространстве.

Актуальность применения мультивихревых сепараторов [3] в зерноперерабатывающих линиях обусловлена необходимостью снизить нагрузку на фильтрующие элементы без существенного увеличения энергопотребления аспирационной системы. В отличие от одиночного крупномасштабного вихря в циклоне, мультивихревой аппарат формирует совокупность локальных вихревых зон малого размера.

Цель исследований. Целью работы является расчетная оценка возможности применения мультивихревого сепаратора в системе очистки аспирационного воздуха зерноперерабатывающего производства.

Материалы и методы исследований. В качестве объекта рассмотрена аспирационная линия зерноперерабатывающего производства, в которой мультивихревой сепаратор используется как ступень предварительной очистки перед фильтрующим аппаратом. Расчетный поток принимался запыленным воздухом с частицами растительного происхождения. Диапазон размеров частиц составлял от 1 до 100 мкм, что соответствует мелкой и средней фракции зерновой пыли, характерной для процессов транспортирования и переработки зерна.

В расчетной схеме варьировалась скорость воздушного потока в аппарате. Рассматривались три характерных режима: 6, 9 и 12 м/с. Для каждого режима определялась расчетная фракционная эффективность улавливания частиц. Повышение скорости рассматривалось как фактор, усиливающий инерционное отклонение частиц от линий тока, но одновременно увеличивающий гидравлическое сопротивление аппарата.

Для сопоставления с традиционным техническим решением дополнительно выполнена расчетная оценка гидравлического сопротивления мультивихревого сепаратора и условного циклона при одинаковом диапазоне скоростей. Такой подход позволяет оценить не абсолютные проектные параметры конкретного промышленного аппарата,

а характер изменения основных эксплуатационных показателей инженерного выбора режима работы аспирационной системы.

Результаты исследований. Расчетная зависимость фракционной эффективности улавливания зерновой пыли показывает, что увеличение скорости воздушного потока приводит к смещению кривой эффективности в область меньших размеров частиц. При скорости 6 м/с аппарат преимущественно улавливает частицы крупнее 30–40 мкм. Такой режим может быть достаточным для предварительного удаления крупной органической пыли, однако его эффективность в отношении мелкодисперсной фракции ограничена. При скорости 9 м/с расчетная область интенсивного роста эффективности смещается к частицам порядка 20–30 мкм. При дальнейшем увеличении скорости до 12 м/с возрастает улавливание частиц размером менее 20 мкм, что повышает технологическую значимость аппарата как предварительной ступени очистки (рис. 1).

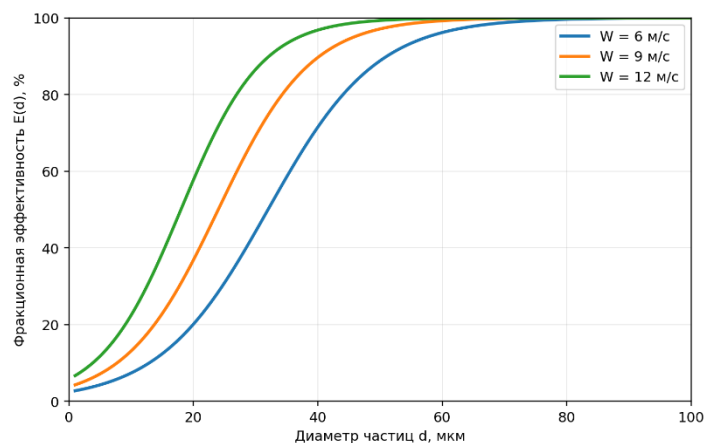


Рисунок 1 – Расчетная фракционная эффективность улавливания зерновой пыли мультивихревым сепаратором при различных скоростях воздушного потока

Одновременно установлено, что рост скорости сопровождается увеличением гидравлического сопротивления. Сравнительная расчетная зависимость показывает, что при одинаковых скоростях мультивихревой сепаратор характеризуется меньшим сопротивлением, чем условный

циклонный аппарат. Это связано с отсутствием развитого протяженного закрученного потока и меньшей длиной траектории газа внутри рабочей зоны. При скорости 10 м/с расчетное сопротивление мультивихревого аппарата составляет около 335 Па, тогда как для циклона оно превышает 700 Па. Следовательно, при предварительной очистке аспирационного воздуха мультивихревой сепаратор может обеспечить более благоприятное соотношение между эффективностью улавливания и энергетическими затратами на перемещение воздуха (рис. 2).

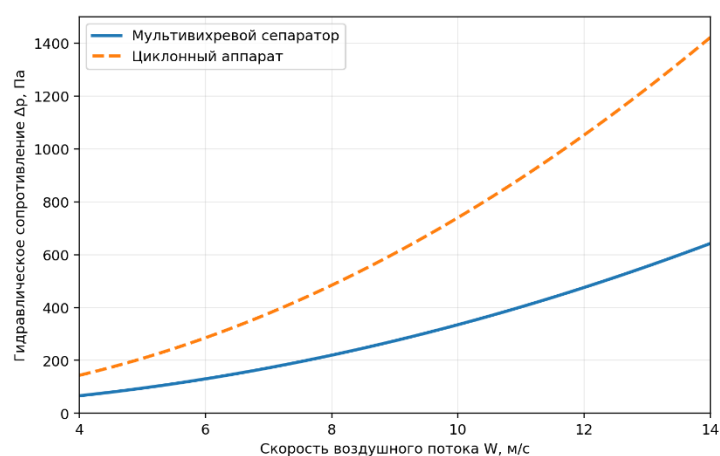


Рисунок 2 – Расчетное гидравлическое сопротивление мультивихревого сепаратора и циклонного аппарата

Полученные результаты показывают, что рациональный диапазон скорости для рассматриваемого аппарата находится в пределах 9–12 м/с. При меньших скоростях снижается эффективность улавливания мелкодисперсной пыли, а при дальнейшем увеличении скорости возрастает сопротивление и, соответственно, энергопотребление вентилятора. Поэтому мультивихревой сепаратор целесообразно рассматривать не как самостоятельную замену фильтрующей очистки, а как предварительную ступень, позволяющую удалить значительную часть крупной и средней пылевой фракции до поступления воздуха на фильтры.

Выводы. 1. Увеличение скорости воздушного потока с 6 до 12 м/с повышает фракционную эффективность улавливания и смещает рабочую

область аппарата в сторону меньших размеров частиц, однако сопровождается ростом гидравлического сопротивления. 2. Рациональным расчетным диапазоном работы мультивихревого сепаратора является скорость 9–12 м/с, при которой достигается компромисс между эффективностью предварительного обеспыливания и энергозатратами аспирационной системы.

Библиографический список

1. Cortés C., Gil A. Modeling the Gas and Particle Flow inside Cyclone Separators // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007. Vol. 33. No. 5. P. 409–452. DOI: 10.1016/j.pecs.2007.02.001.
2. Experimental Determination of Hydraulic Resistance of a Multi-Vortex Separator / V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, O. S. Dmitrieva [et al.] // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 58, No. 3. – P. 832-837. – DOI 10.1134/S0040579524601420.
3. Kanageswari S. V., Tabil L. G., Sokhansanj S. Dust and Particulate Matter Generated during Handling and Pelletization of Herbaceous Biomass: A Review // *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 7. Art. 2634. DOI: 10.3390/en15072634.

References

1. Cortés C., Gil A. Modeling the Gas and Particle Flow inside Cyclone Separators // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007. Vol. 33. No. 5. P. 409–452. DOI: 10.1016/j.pecs.2007.02.001.
2. Experimental Determination of Hydraulic Resistance of a Multi-Vortex Separator / V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, O. S. Dmitrieva [et al.] // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 58, No. 3. – P. 832-837. – DOI 10.1134/S0040579524601420.
3. Kanageswari S. V., Tabil L. G., Sokhansanj S. Dust and Particulate Matter Generated during Handling and Pelletization of Herbaceous Biomass: A Review // *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 7. Art. 2634. DOI: 10.3390/en15072634.