

УДК 66.074.2

UDC 66.074.2

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)

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА С V-ОБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ**

**NUMERICAL MODELING OF A SEPARATION DEVICE WITH V-SHAPED ELEMENTS FOR REDUCING ENERGY CONSUMPTION IN THE AGRO-INDUSTRIAL SECTOR**

Абдуллина Азалия Айратовна  
Студент  
SPIN – код автора: 8779-4251  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Abdullina Azaliya Airatovna  
Student  
RSCI SPIN-code: 8779-4251  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Шинкевич Татьяна Олеговна  
Канд. техн. Наук, доцент  
SPIN – код автора: 9724-1390  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Shinkevich Tatyana Olegovna  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
RSCI SPIN-code: 9724-1390  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Повышение энергоэффективности процессов очистки воздуха от твердых частиц в агропромышленном производстве остаётся одной из приоритетных задач при разработке новых технических решений. В данной работе предложено численное исследование эффективности функционирования оригинального очистительного устройства, в конструкции которого применены вытянутые угловые элементы, расположенные в шахматном порядке. Данное инженерное решение позволяет совместить механизмы инерционного и гравитационного осаждения частиц, обеспечивая при этом снижение энергопотребления и уменьшение гидравлического сопротивления потоку воздуха. Математическая модель реализована в программной среде ANSYS Fluent, где проанализировано влияние размеров частиц на эффективность улавливания при фиксированной скорости потока. Показано, что устройство обеспечивает 100% эффективность осаждения частиц размером от 30,2 мкм и выше. Расчетное гидравлическое сопротивление составляет 180 Па, что значительно ниже аналогичного показателя традиционных циклонов. Экономическая оценка показала, что при замене стандартного циклона на предложенный сепаратор срок окупаемости проекта составляет 3,4 года. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения подобного устройства в составе аграрных систем очистки воздуха, особенно при длительных циклах эксплуатации

Improving the energy efficiency of air purification processes from solid particles in agro-industrial production remains one of the key priorities in the development of new technical solutions. This paper presents a numerical study on the performance of an original purification device featuring elongated angular elements arranged in a staggered pattern. This engineering approach combines inertial and gravitational mechanisms of particle deposition, allowing for reduced energy consumption and lower aerodynamic resistance to airflow. The mathematical model was implemented in the ANSYS Fluent software environment, where the influence of particle size on collection efficiency at a fixed flow velocity was analyzed. It was demonstrated that the device achieves 100% capture efficiency for particles with a diameter of 30.2  $\mu\text{m}$  and larger. The calculated pressure drop was 180 Pa, which is significantly lower than the typical resistance of conventional cyclones. The economic evaluation showed that replacing a standard cyclone with the proposed separator results in a payback period of 3.4 years. The obtained results confirm the potential for integrating this type of device into agricultural air purification systems, particularly in long-term operation scenarios.

Ключевые слова: АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ОЧИСТКА ВОЗДУХА, СЕПАРАТОР, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,

Keywords: AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, AIR PURIFICATION, SEPARATOR, NUMERICAL MODELING, ANSYS FLUENT, PRESSURE DROP,

ANSYS FLUENT, ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЕ,  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ОКУПАЕМОСТЬ

ENERGY EFFICIENCY, PAYBACK PERIOD.

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-044>

**Введение.** Развитие сельскохозяйственного сектора требует не только повышения производительности, но и внедрения решений, позволяющих минимизировать эксплуатационные затраты и негативное воздействие на окружающую среду. В современном аграрном производстве широко используются системы пневмотранспорта и измельчения сырья, что сопровождается образованием большого количества пылевых частиц. Эти мелкодисперсные включения не только ухудшают санитарно-гигиенические условия на производстве, но и приводят к ускоренному износу оборудования, снижению производительности, а также увеличению затрат на техническое обслуживание.

Традиционно для улавливания таких частиц применяются циклонные устройства, обладающие сравнительно простой конструкцией и высокой надежностью. Однако практика показывает, что циклоны обладают значительным гидравлическим сопротивлением, а значит — высоким энергопотреблением. Более того, их эффективность снижается при уменьшении размеров частиц, что особенно критично при работе с мукой, комбикормами, минеральными добавками и другими порошкообразными материалами.

Существующие направления модернизации пылеулавливающих систем стремятся либо к увеличению эффективности улавливания за счёт усложнения геометрии, либо к снижению энергопотребления путём оптимизации аэродинамических характеристик. Однако далеко не все решения позволяют одновременно достичь баланса между этими двумя показателями. В этом контексте особый интерес представляют устройства,

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/44.pdf>

конструкция которых позволяет эффективно использовать как инерционные, так и гравитационные механизмы осаждения, что потенциально ведет к снижению давления и повышению улавливающей способности без значительного увеличения энергозатрат.

Одним из таких решений стало применение вытянутых V-образных пластин, расположенных в шахматном порядке, которые направляют поток пылевоздушной смеси по траекториям, способствующим осаждению частиц. Теоретически подобная конструкция может снизить уровень турбулентности, уменьшить сопротивление и одновременно повысить эффективность улавливания за счет многократного взаимодействия частиц с поверхностью пластин. Важным этапом при проектировании такого устройства является проведение численного моделирования, позволяющего еще на этапе разработки оценить его аэродинамические характеристики и рассчитать экономическую эффективность эксплуатации.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** Современное агропромышленное производство невозможно представить без развитой системы пылеулавливания. На этапах хранения, переработки и транспортировки сыпучих материалов – зерна, комбикормов, удобрений – в воздух поднимается значительное количество мелкодисперсных частиц. Эти частицы не только ухудшают условия труда, но и способствуют быстрому износу оборудования, загрязнению окружающей среды и росту затрат на техническое обслуживание. Ввиду этого задачи эффективной и экономически оправданной очистки воздуха приобретают особую значимость.

Наиболее часто в таких системах применяются циклонные сепараторы. Это обусловлено их надёжностью, простотой конструкции и способностью функционировать без сложной автоматики. Однако у циклонов имеются и очевидные ограничения. Они создают значительное

сопротивление воздушному потоку, что приводит к повышенным энергозатратам. Кроме того, их эффективность резко снижается при улавливании частиц с размером менее 20–30 мкм, что особенно критично для аграрного сектора, где присутствуют аэрозоли с частицами различных фракций.

В связи с этим всё более активным становится поиск конструктивных решений, которые позволяют объединить высокую эффективность очистки с низкими эксплуатационными затратами. В последние годы появляется всё больше работ, посвящённых модификации сепарационных устройств: предлагаются вставки сложной геометрии, дополнительные направляющие элементы, рельефные или перфорированные пластины. Некоторые исследователи рассматривают применение вихреобразующих тел, которые интенсифицируют процессы осаждения частиц за счёт создания локальных турбулентных зон. Однако далеко не все решения подходят для массового внедрения в сельскохозяйственные предприятия из-за сложности реализации, высокой стоимости или необходимости частого обслуживания.

Актуальным направлением является разработка устройств, основанных на комбинировании гравитационных и инерционных механизмов осаждения. Особенно перспективным представляется применение V-образных пластин, размещённых в шахматном порядке. Такая конфигурация позволяет создать условия для многократного изменения траектории движения частиц, увеличивая вероятность их осаждения на поверхностях. Одновременно с этим форма и расположение элементов способствуют снижению общего сопротивления воздушному потоку, что позитивно сказывается на энергопотреблении.

Методы численного моделирования, в частности CFD-анализ в среде ANSYS Fluent, предоставляют возможность комплексной оценки эффективности новых конструкций без необходимости их немедленного

изготовления. Это особенно ценно на этапе опытно-конструкторских работ. Таким образом, разработка и исследование устройств с вытянутыми угловыми элементами открывает путь к созданию энергоэффективных решений, актуальных для предприятий агропромышленного комплекса.

**Цель исследований.** Оценить эффективность использования сепарационного устройства с вытянутыми угловыми элементами, а также экономическую целесообразность внедрения данного проекта.

**Материалы и методы исследований.** Для проведения исследований было построено очистительное устройство с прямоугольными пластинами, принцип очистки которого совмещает в себе работу центробежных или инерционных сил, а также сил тяжести. Конструктивно данное устройство представляет собой несколько рядов вытянутых угловых элементов, расположенных в шахматном порядке и погруженных в улавливающую решетку, где вся конструкция облачена в корпус, имеющий отверстия для входного и выходного патрубков.

Для определения эффективности и гидравлического сопротивления было использовано программное обеспечение ANSYS Fluent. На входе в модель задавались скорость потока  $w = 2$  м/с, размер частиц  $a$  от 10 до 138 мкм, а на выходе атмосферное давление. Эффективность устройства была вычислена согласно (1):

$$E_i = \frac{N_{\text{non}}}{N}, \quad (1)$$

где  $E_i$  – эффективность улавливание частиц;  $N_{\text{non}}$  и  $N$  – количество частиц, попавших в бункер, и общее число частиц в потоке устройства.

Также было найдено значение гидравлического сопротивление согласно (2), как разность давлений на входе и выходе:

$$\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}, \quad (2)$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление устройства;  $p_{\text{вх}}$ ,  $p_{\text{вых}}$  – давление на входе в устройство и выходе из него, соответственно.

Для определения экономической целесообразности будем использовать такой показатель, как период окупаемости проекта  $T_{ок}$ , вычисляемый согласно (3):

$$T_{ок} = \frac{I}{ЧД}, \quad (3)$$

где  $I$  – инвестиции в проект;  $ЧД$  – среднегодовой чистый доход от проекта.

Для упрощения расчетов не будем учитывать ставку дисконтирования, также примем инвестиции  $I$  в проект как стоимость оборудования, а  $ЧД$  – отношение суммарного дохода  $D$  за вычетом инвестиций к сроку жизни нашего проекта. В качестве дохода будем считать выгоду при уплате за электроэнергию при внедрении нашего устройства вместо циклонного сепаратора. Для определения годового дохода воспользуемся формулой (4):

$$D = (N_u - N_c) \cdot c_э \cdot t, \quad (4)$$

где  $N_u$ ,  $N_c$  – потребляемая мощность циклона и сепаратора;  $c_э$  – тариф за электроэнергию;  $t$  – часы работы в году.

**Результаты исследований.** В ходе моделирования были получены зависимости эффективности сепарационного устройства с вытянутыми угловыми элементами  $E$  от их фракции  $a$  с плотностью  $\rho=2000$  кг/м<sup>3</sup> при скорости потока  $w = 2$  м/с (таблица 1)

Таблица 1 – Значение фракционной эффективности

Размер частиц $a$ , мкм	Эффективность улавливания частиц $E$ , %
10	0,2
11,5	4,74
13,2	13,3
15,1	22,6
17,4	34,2
20	55,6
23	67
26,3	81,4
30,2	100
35	100
40	100
46	100
52,5	100
60,3	100
70	100
80	100
91	100
105	100
120	100
138	100

Для удобства представим значения таблицы 1 в виде графика фракционной эффективности, а также с целью анализа добавим значения циклона ЦН-11 при данных входных параметрах (рис.2). В среднем при входной скорости в 2 м/с эффективность данного устройства достигает порядка 81%. При размере частиц больше 30,2 мкм устройство начинает улавливать частицы со 100% эффективностью.

Также было получено значение гидравлического сопротивления при данной скорости в нашем устройстве, значение которого составляет 180 Па, отметим, что при аналогичных входных параметрах гидравлическое сопротивление в циклонах достигает порядка 1000 Па.

В проведенном ранее исследовании [1] было выявлено, что потребляемая мощность сепаратором равна 0,34 кВт, а у циклона 1,25 кВт, стоимость тарифа  $c$ , примем равной 5 руб/кВт, а  $t = 8520$  ч, а

себестоимость такой установки порядка около 100 тыс. Тогда согласно (4)  $D$  будет равно:

$D = (1,5 - 0,34) \cdot 5 \cdot 8520 = 49416$  руб. Для удобства составим таблицу с полями инвестиции, годовой доход и суммарный доход по срокам жизни нашего проекта (табл. 2)

Таблица 2 – Оценка экономической целесообразности данного проекта.

Срок жизни	0	1	2	3	4	5
Инвестиции, руб.	100 000					
Доход, руб.		49 416	49 416	49 416	49 416	49 416
Суммарный доход, руб	-100 000	-50 584	-1 168	48 248	97664	147 080

Чистый доход по истечению 5 лет равен 147 080 руб., тогда среднегодовой чистый доход  $ЧД = \frac{147080}{5} = 29416$  руб.

Тогда  $T_{ок}$  по (3) будет равен:  $T_{ок} = \frac{100000}{29416} \approx 3,4$  года

Согласно полученным результатам, наиболее эффективно использовать данное устройство в проектах, требующих более длительную эксплуатацию устройства

**Выводы.** 1. При скорости 2 м/с эффективность сепарационного устройства с вытянутыми угловыми элементами достигается порядка 81%. 2. При скорости 2 м/с гидравлическое сопротивление устройства составляет 180 Па, а у циклонов при тех же параметрах 1000 Па. 3. При внедрении данного устройства вместо циклонов чистый доход по истечению 5 лет составит 147 080 руб.,  $T_{ок}$  3,4 года.

### Библиографический список

1. Техничко-экономическое обоснование внедрения сепарационных устройств с дугообразными элементами в реакторах с псевдоожиженным слоем / В. Э. Зинуров, Э. И. Салахова, И. Н. Мадышев, А. А. Абдуллина // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2023. – № 12(230). – С. 36-49.

### References

1. Tehniko-jekonomicheskoe obosnovanie vnedrenija separacionnyh ustrojstv s dugoobraznymi jelementami v reaktorah s psevdoozhizhennym sloem / V. Je. Zinurov, Je. I. Salahova, I. N. Madyshev, A. A. Abdullina // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo jekonomicheskogo universiteta. – 2023. – № 12(230). – S. 36-49.