

УДК 621.928.6

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

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ В СЕПАРАТОРЕ С V-ОБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Абдуллина Азалия Айратовна  
студент

SPIN – код автора: 8779-4251

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Попкова Оксана Сергеевна

Канд. техн. Наук, доцент

SPIN – код автора: 4884-0466

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Современные требования агропромышленного комплекса к качеству и чистоте продукции требуют совершенствования технологий разделения и очистки материалов. В данной работе представлено исследование по численному моделированию процесса улавливания частиц в сепараторе с V-образными элементами, что позволяет повысить эффективность переработки сырья. Для проведения численных расчётов использовалась программа ANSYS Fluent, где применялись методы конечных объёмов и дискретно-фазовая модель (DPM), обеспечивающие детализированный анализ траекторий частиц и их взаимодействие с конструктивными элементами сепаратора. Геометрическая модель устройства была создана в программе КОМПАС-3D. Исследования проводились с целью оценки влияния скорости воздушного потока и плотности частиц на эффективность улавливания. Результаты численного моделирования показали, что максимальная эффективность сепарации, достигающая 100%, наблюдается при скоростях воздушного потока до 1 м/с. При увеличении скорости эффективность снижается, что связано с возвратом частиц в поток из-за импульса, создаваемого воздушным потоком. Дополнительно установлено, что увеличение плотности частиц положительно сказывается на их улавливании, увеличивая эффективность процесса на 5%. Разработанная методика и полученные результаты позволяют оптимизировать конструкцию сепараторов для повышения качества очистки, снижения энергозатрат и улучшения производственных показателей в агропромышленном секторе

Ключевые слова: СЕПАРАТОР, V-ОБРАЗНЫЕ

UDC 621.928.6

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

### **NUMERICAL MODELING OF PARTICLE CAPTURE IN A SEPARATOR WITH V-SHAPED ELEMENTS**

Abdullina Azaliya Airatovna  
student

RSCI SPIN-code: 8779-4251

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Popkova Oksana Sergeevna

Cand.Tech.Sci., Associate Professor

RSCI SPIN-code: 4884-0466

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Modern requirements of the agro-industrial sector for product quality and purity necessitate the improvement of separation and purification technologies. This study presents research on numerical modeling of particle capture in a separator with V-shaped elements, aimed at increasing the efficiency of raw material processing. The numerical simulations were conducted using the ANSYS Fluent software, applying the finite volume method and Discrete Phase Model (DPM) for a detailed analysis of particle trajectories and their interactions with the separator's structural components. The geometric model of the device was created using the KOMPAS-3D software. The study aimed to evaluate the impact of air flow velocity and particle density on separation efficiency. The results of the numerical modeling demonstrated that the maximum separation efficiency, reaching 100%, was observed at air flow velocities of up to 1 m/s. As the velocity increased, the efficiency decreased due to the return of particles into the flow caused by the impulse generated by the air stream. Additionally, it was found that increasing particle density positively affected their capture, improving the process efficiency by 5%. The developed methodology and obtained results enable the optimization of separator designs to enhance cleaning quality, reduce energy consumption, and improve production performance in the agro-industrial sector

Keywords: SEPARATOR, V-SHAPED ELEMENTS,

ЭЛЕМЕНТЫ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,  
ANSYS FLUENT, ДИСКРЕТНО-ФАЗОВАЯ  
МОДЕЛЬ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ  
КОМПЛЕКС, УЛАВЛИВАНИЕ ЧАСТИЦ, CFD

NUMERICAL MODELING, ANSYS FLUENT,  
DISCRETE PHASE MODEL, AGRO-INDUSTRIAL  
SECTOR, PARTICLE CAPTURE, CFD

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-204-002>

**Введение.** Эффективная переработка сельскохозяйственной продукции является важным условием для повышения производительности агропромышленного комплекса. Учитывая необходимость переработки больших объемов зерна и других растительных материалов, производственные процессы требуют использования высокоэффективных технологий разделения и очистки. В последние десятилетия значительно возросла потребность в устройствах, способных эффективно выделять и удалять посторонние частицы из воздушно-материальных потоков.

Актуальной задачей на современном этапе является совершенствование технологий сепарации, которые позволяют не только улучшить чистоту обрабатываемых материалов, но и снизить затраты на энергию и обслуживание оборудования. В условиях повышения требований к экологической безопасности и ресурсосбережению внедрение инновационных решений в области разделения частиц становится неотъемлемой частью устойчивого развития агропромышленного сектора. Это особенно актуально в условиях возрастающих объемов производства и необходимости минимизации потерь при переработке зерновых культур.

Модернизация существующих технологий, включающая оптимизацию конструкции сепараторов, может существенно повысить производительность оборудования и снизить его эксплуатационные затраты. В данном контексте важно учитывать физические свойства разделяемых материалов, такие как размер, плотность и форма частиц,

<http://ej.kubagro.ru/2024/10/pdf/02.pdf>

которые оказывают значительное влияние на эффективность процесса сепарации.

Оптимизация сепарационных устройств позволяет не только сократить энергозатраты, но и уменьшить выбросы пыли, что соответствует современным экологическим стандартам. Таким образом, разработка новых конструктивных решений в области разделения материалов является актуальной задачей для повышения устойчивости агропромышленного производства и улучшения его экономических показателей.

### **Состояние исследований и актуальность проблемы.**

Сепарационные устройства, применяемые в агропромышленном комплексе, остаются важной темой исследований на протяжении последних десятилетий. Традиционные конструкции основаны на принципах гравитационной, аэродинамической и центробежной сепарации, что позволяет эффективно отделять различные фракции материала. Тем не менее, в последние годы акцент сместился на разработку новых типов сепараторов, которые обеспечивают более высокую степень очистки при меньших затратах энергии и ресурсоемкости. Это связано с тем, что существующие установки зачастую не соответствуют требованиям современных сельскохозяйственных предприятий, стремящихся к повышению экологичности и экономической эффективности.

Одним из актуальных направлений исследований является использование V-образных элементов в конструкциях сепараторов [1]. Такая форма позволяет улучшить поток воздуха и увеличить эффективность отделения частиц различной плотности и размера. Исследования показывают, что внедрение подобных конструктивных решений может значительно повысить коэффициент улавливания частиц,

что особенно важно для агропромышленного сектора, где чистота продукции напрямую влияет на её рыночную стоимость.

Современные исследования в области численного моделирования подтверждают высокую эффективность использования V-образных элементов для интенсификации процессов сепарации. В частности, применение CFD-методов позволяет более детально исследовать влияние параметров конструкции и потоковых характеристик на эффективность работы сепараторов.

Несмотря на накопленные знания и разработки, остаются нерешённые вопросы, касающиеся интеграции таких конструкций в существующие производственные линии и их адаптации к различным типам материалов. Дальнейшие исследования в этой области помогут разработать более универсальные и гибкие решения, что, в свою очередь, позволит повысить общую производительность агропромышленных предприятий и снизить себестоимость продукции.

**Цель исследований.** Целью данного исследования является численное моделирование улавливания частиц в сепараторе с V-образными элементами.

**Материалы и методы исследований.** Для достижения поставленной цели использовалась современная программная платформа ANSYS Fluent, которая является одной из ведущих систем для проведения численного моделирования процессов динамики жидкостей и газов. Эта программа обеспечивает возможность точного анализа аэродинамических характеристик и поведения частиц в воздушных потоках, что особенно важно при проектировании и оптимизации сепарационных устройств.

ANSYS Fluent позволяет проводить моделирование процессов на основе метода конечных объёмов, что обеспечивает высокую точность при расчёте потоков и взаимодействий частиц с конструктивными элементами устройства. В рамках исследования использовалась модель

турбулентности, что позволило учитывать влияние турбулентных структур на процесс сепарации частиц. Применение данной модели позволяет более точно оценить эффективность улавливания мелких фракций, которые могут оставаться в потоке при недостаточной турбулентности.

Для создания геометрической модели сепаратора была использована программа КОМПАС-3D, которая широко применяется для трёхмерного моделирования и подготовки моделей для последующего анализа в ANSYS Fluent. При помощи КОМПАС-3D была создана детализированная трёхмерная модель сепаратора с V-образными элементами, что позволило более точно воспроизвести реальные условия работы устройства. После построения модели она была экспортирована в ANSYS Fluent, где были проведены дальнейшие расчёты и анализ характеристик воздушного потока.

Кроме ANSYS Fluent, для проверки результатов и подтверждения корректности численного моделирования на практике используются и другие программные пакеты, такие как SolidWorks Flow Simulation, COMSOL Multiphysics и FlowVision. Эти программы позволяют дополнительно анализировать динамику потоков и улавливание частиц, что способствует повышению точности получаемых данных. Например, SolidWorks Flow Simulation и FlowVision могут быть использованы для моделирования распределения скорости и давления в разных секциях сепаратора, что позволяет выявлять критические зоны и оптимизировать конструктивные параметры устройства.

Для моделирования улавливания частиц была выбрана дискретно-фазовая модель (Discrete Phase Model, DPM). Данная модель позволяет учитывать траектории частиц в потоке, их столкновения с конструктивными элементами, а также возможность адгезии частиц на стенках сепаратора. Это особенно важно при моделировании улавливания частиц с различной плотностью и размером, что характерно для

агропромышленных применений, где потоки содержат как мелкие пылевые частицы, так и более крупные включения.

Для настройки граничных условий использовались данные, полученные на основе экспериментальных исследований аналогичных устройств. Были установлены входные и выходные границы потока, а также заданы параметры, такие как скорость воздушного потока и концентрация частиц. Исследования проводились для различных размеров частиц (от 10 до 316 микрон), чтобы определить оптимальные параметры работы сепаратора и выявить наиболее эффективные конструктивные решения для улавливания мелких частиц.

Особое внимание было уделено выбору подходящих моделей турбулентности, так как именно турбулентность оказывает значительное влияние на процесс разделения частиц. Применялась  $k$ - $\epsilon$  модель, которая позволяет учитывать влияние вихрей и турбулентных структур на траектории частиц, что значительно повышает точность прогноза эффективности сепарации.

Для оценки эффективности работы сепаратора использовался показатель улавливания частиц, определяемый как отношение количества захваченных частиц к общему количеству частиц, поступающих в устройство.

**Результаты исследований.** В ходе численного моделирования были получены данные о фракционной эффективности при различных скоростях потока на входе в сепарационную систему и различных значениях плотности улавливаемых частиц. Диапазон скоростей изменялся в пределах от 0,5 до 4 м/с (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Фракционная эффективность  $E$  при различной скорости потока  $w$ .

Плотность частиц $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2000					4000				
	0,5	1	2	3	4	0,5	1	2	3	4
Скорость потока $w$ , м/с	Эффективность $E$ , %					Эффективность $E$ , %				
Размер частиц $a$ , мкм	Эффективность $E$ , %					Эффективность $E$ , %				
10	22	0	0	0	0	30	22	0	0	0
23	51	62	33	24	0	89	83	80	68	49
30	76	85	78	49	39	98	97	71	61	56
40	90	91	62	64	61	100	99	78	66	52
52	100	96	71	62	53	100	92	81	58	48
60	100	99	75	65	52	100	93	67	48	42
70	100	97	81	65	44	100	96	57	44	36
80	100	91	82	51	40	100	94	44	38	36
90	100	95	62	42	40	100	96	46	42	36
105	100	94	49	38	33	100	98	54	40	32
139	100	95	48	43	34	100	100	52	35	33
159	100	99	53	38	25	100	100	57	38	27
209	100	99	56	34	29	100	100	80	47	37
240	100	100	56	37	32	100	100	92	52	42
275	100	100	62	39	30	100	100	94	62	46
316	100	100	79	48	34	100	100	97	74	49

Для удобства анализа результаты были сведены в таблицу и в график, на котором представлена зависимость средней эффективности, являющейся среднеарифметическим значением фракционной эффективности, от скорости на входе в сепарационную систему при различных плотностях улавливаемых частиц (рис.1). Согласно графику, наиболее успешные результаты по очистке, эффективность в пределах 100-90% достигаются при относительно невысоких скоростях: от 0,5 до 1 метра в секунду. Важно подчеркнуть, что при более высоких скоростях результативность не достигает таких же показателей.

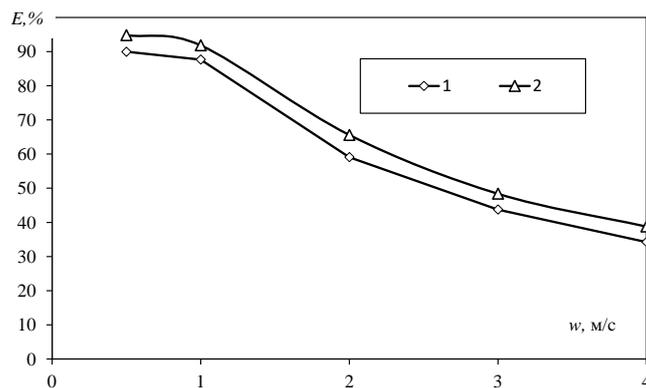


Рисунок 1 – График зависимости средней эффективности сепарационной системы от скорости потока на входе при различной плотности улавливаемых частиц  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>

Это может быть обусловлено тем, что при таких значениях скорости частица, попадая вместе с воздушным потоком в сепарационное устройство, получает определённый импульс  $p$ , способный вернуть частицу обратно в газовый поток. В следствие чего эффективность системы снижается, что хорошо видно на графике при увеличении скорости от 1 до 4 м/с. Стоит отметить, что изменение плотности частиц в данном случае незначительно сказывается на эффективности: при плотности 4000 кг/м<sup>3</sup> она примерно на 5% выше, чем при 2000 кг/м<sup>3</sup>. Скорее всего это связано с тем, что сила тяжести, действующая на частицы при увеличении их плотности будет в 2 раза выше, следовательно, в таком случае она с большей вероятностью окажется в бункере, чем унесется потоком из системы.

**Выводы.** 1. Созданное устройство демонстрирует высокую результативность при скоростях менее 1 м/с (рекомендуемый диапазон скоростей). 2. При более высоких скоростях существует вероятность того, что частицы будут возвращаться в поток и впоследствии выноситься из устройства. 3. Увеличение плотности приводит к незначительному увеличению эффективности порядка 5%.

### **Библиографический список**

1. Абдуллина, А. А. Влияние угла раскрытия V-образных сепарационных элементов на эффективность пылеуловителя при очистке воздуха от пищевой пыли / А. А. Абдуллина, В. Э. Зинуров, Л. Т. Воронина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 200. – С. 302-309.

### **References**

1. Abdullina, A. A. Vlijanie ugla raskrytija V-obraznyh separacionnyh jelementov na jeffektivnost' pileulovitelja pri ochistke vozduha ot pishhevoj pyli / A. A. Abdullina, V. Je. Zinurov, L. T. Voronina // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – № 200. – S. 302-309.