

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОЖИДКОСТНОГО СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПЫЛИ

© 2026 Харьков В. В.¹✉, Николаев А. Н.¹, Зиганшин Б. Г.²¹Казанский национальный исследовательский технологический университет

(г. Казань, Российская Федерация)

²Казанский государственный аграрный университет

(г. Казань, Российская Федерация)

✉ v.v.kharkov@gmail.com

Реферат. Загрязнение воздушной среды производственной пылью на предприятиях агропромышленного комплекса оказывает многоплановое негативное воздействие, создавая прямую угрозу здоровью персонала, снижая срок службы оборудования и повышая риски возникновения чрезвычайных ситуаций для окружающей среды. Существующие методы очистки, особенно для частиц размером менее 10 мкм, часто неэффективны или энергозатратны. Целью работы является комплексное теоретическое обоснование и разработка аналитических моделей для оценки эффективности нового газожидкостного вихревого сепарационного устройства с тангенциально-лопаточным завихрителем, комбинирующего центробежный и инерционный механизмы сепарации в поперечном потоке. На основе анализа траекторий движения частиц и уравнений массопереноса были разработаны аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать фракционную эффективность сепарации в зависимости от расходов газа (G) и орошающей жидкости (L). Установлено, что эффективность центробежной сепарации критически зависит от соотношения L/G: увеличение подачи жидкости снижает крутку потока. Так, для частиц диаметром 10 мкм при соотношении L/G = 0,12 эффективность достигает 80%, но падает до 18% при L/G = 0,47. В то же время эффективность инерционного осаждения на каплях жидкости зависит от нагрузки по жидкости, демонстрируя положительную корреляцию с размером частиц. Увеличение расхода жидкости с 21 до 168 кг/ч повышает эффективность инерционного механизма для частиц 10 мкм с 56% до 94%. Расчет суммарной эффективности сепарации подтверждает высокий потенциал устройства для улавливания широкого фракционного состава производственной пыли. Разработанные модели и полученные результаты создают основу для проектирования высокоэффективных систем пылеочистки, целенаправленно адаптированных к условиям агропромышленного комплекса, в частности для предприятий по производству комбикормов и переработке зерна.

Ключевые слова: вихревой сепаратор, пыль, орошение, эффективность разделения, производство кормов, зернопереработка.

Для цитирования: Харьков В.В., Николаев А.Н., Зиганшин Б.Г. Исследование эффективности газожидкостного сепарационного устройства для улавливания производственной пыли // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 110-118. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-110-118

STUDY THE EFFICIENCY OF GAS-LIQUID SEPARATION DEVICE FOR INDUSTRIAL DUST COLLECTION

© 2026 Kharkov V.V.^a✉, Nikolaev A.N.^a, Ziganshin B.G.^b^aKazan National Research Technological University

(Kazan, Russian Federation)

^bKazan State Agrarian University

(Kazan, Russian Federation)

✉ v.v.kharkov@gmail.com

Abstract. Air pollution by industrial dust at agricultural enterprises has a multifaceted negative impact, posing a direct threat to personnel health, reducing the service life of equipment and increasing the risk of environmental emergencies. Existing cleaning methods, especially for particles smaller than 10 µm, are often ineffective or energy-intensive. The aim of this study is to provide a comprehensive theoretical justification and develop analytical models for evaluating the efficiency of a new gas-liquid vortex separation device with a tangential vane swirler, combining centrifugal and inertial cross-flow separation mechanisms. Based on an analysis of particle trajectories and mass transfer equations, analytical relationships were developed that allow us to predict the fractional separation efficiency depending on the gas (G) and irrigating liquid (L) flow rates. It was found that efficiency of centrifugal separation is critically dependent on the L/G ratio: increasing the liquid feed reduces flow swirl. Thus, for particles with a diameter of 10 µm, with an L/G ratio of 0.12, the efficiency reaches 80%, but drops to 18% at L/G = 0.47. At the same time, the efficiency of inertial sedimentation on liquid droplets depends on the

liquid load, demonstrating a positive correlation with particle size. Increasing the liquid flow rate from 21 to 168 kg/h increases the efficiency of the inertial mechanism for 10 μm particles from 56% to 94%. Calculation of the overall separation efficiency confirms the high potential of the device for capturing a wide fractional composition of industrial dust. The developed models and obtained results provide the basis for designing highly efficient dust removal systems specifically tailored to the conditions of the agro-industrial complex, particularly for feed production and grain processing plants.

Key words: vortex separator, dust, irrigation, separation efficiency, feed production, grain processing.

For citation: Kharkov VV, Nikolaev AN, Ziganshin BG. [Study the efficiency of gas-liquid separation device for industrial dust collection]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 110-118 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-110-118

Введение. В агропромышленном комплексе (АПК) проблема пылеобразования носит системный характер, охватывая ключевые этапы послеуборочной обработки и переработки растительного сырья [1]. На элеваторах, мукомольных и комбикормовых заводах интенсивное выделение пыли сопровождается процессами приемки, транспортировки, сушки, дробления и гранулирования зерна и кормовых компонентов. Наиболее высокие концентрации пыли фиксируются в зонах работы норий, дробилок и смесителей. Специфика пыли на предприятиях АПК заключается в её полидисперсности и органическом происхождении, что обуславливает высокую пожаро- и взрывоопасность [2, 3]. Кроме того, мелкодисперсная фракция (менее 10 мкм) проникает в рабочую зону, создавая прямую угрозу здоровью персонала и провоцируя профессиональные заболевания органов дыхания, а оседающая пыль ускоряет абразивный износ дорогостоящего оборудования и снижает качество готовой продукции [4, 5].

Традиционно для очистки воздуха на предприятиях АПК применяются сухие инерционные пылеуловители, которые эффективны преимущественно для грубодисперсных частиц, но пропускают значительную часть фракции менее 10 мкм, составляющей до 40–60% выбросов мукомольного и комбикормового производств [6, 7]. Фильтрационные методы (в т.ч. рукавные фильтры) обеспечивают высокую степень очистки, однако их применение ограничивается высокими капитальными затратами, сложностью обслуживания в условиях повышенной влажности зерносушильных комплексов и риском забивания фильтрующих пор маслянистыми компонентами комбикормов [8, 9]. Мокрые методы очистки лишены этих недостатков, но требуют оптимизации энергопотребления и расхода воды [10].

Таким образом, актуальной задачей является разработка комбинированных методов, интегрирующих преимущества различных механизмов сепарации. В данной работе предлагается газожидкостное сепарационное устройство с тангенциально-лопаточным завихрителем, в котором одновременно реализуются два взаимодополняющих механизма: центробежный – для частиц средней и крупной дисперсности, и инерционный – для мелких частиц. Преимущество таких устройств заключается в образовании на периферии вращающегося капельного слоя, что повышает эффективность

сепарации за счёт осаждения мелких частиц на каплях [11, 12].

Разработка новых сепараторов на основе натуральных экспериментов требует значительных затрат, что часто неприемлемо для предприятий АПК малого и среднего масштаба. Альтернативой является создание аналитических моделей, основанных на фундаментальных законах и известных параметрах, что позволяет прогнозировать эффективность сепарации без дорогостоящих опытов.

Целью работы является комплексное теоретическое обоснование и разработка аналитических моделей для оценки эффективности газожидкостного сепарационного устройства с тангенциально-лопаточным завихрителем потока газа и комбинированным узлом окончательного разделения.

Условия, материалы и методы. Исследования проводились на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Объектом исследования выступило газожидкостное сепарационное устройство с тангенциально-лопаточным завихрителем, предназначенное для очистки аспирационного воздуха на предприятиях агропромышленного комплекса.

Конструкция исследуемого устройства включает корпус с рабочей зоной, завихритель потока газа и узел окончательного разделения фаз (рис. 1). Проходя с большой скоростью через тангенциально-лопаточный завихритель устройства, очищаемый запыленный газ приобретает вращательно-поступательное движение. В результате понижения давления в осевой части устройства происходит подсосывание жидкости из подводящего патрубка. Поток газа дробит жидкость на капли и вовлекает их в совместное движение. В результате образуется вращающийся капельный слой в непосредственной близости от лопастей завихрителя (зона поперечной сепарации). Выходя из зоны завихрителя, газожидкостный поток попадает в узел окончательного разделения фаз комбинированного типа, в котором капли жидкости оседают на стенке сепарационного стакана и образуют вращающийся слой жидкости, которая продавливается сквозь отверстие в стенке стакана, стекает в кольцевое пространство и выводится из устройства. Для минимизации вторичного уноса капель на стакан установлен тороидальный отсекаТЕЛЬ.

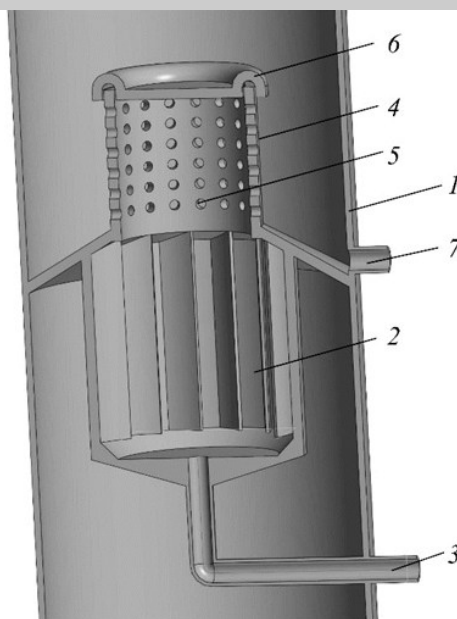


Рис. 1 – Сепарационное устройство с тангенциально-лопаточным завихрителем потока газа:
1 – цилиндрический корпус; 2 – тангенциально-лопаточный завихритель; 3 – патрубок ввода
жидкости; 4 – сепарационный стакан; 5 – отверстия; 6 – тороидальный отсекаТЕЛЬ;
7 – патрубок отвода жидкости

Fig. 1 – Separation device with a tangential-vane gas flow swirler:
1 – cylindrical housing; 2 – tangential-vane swirler; 3 – liquid inlet pipe; 4 – separation cup;
5 – holes; 6 – toroidal separator (baffle); 7 – liquid outlet pipe

В качестве исходных данных для расчета использованы физико-химические свойства компонентов трехфазной системы: воздушной среды (газовая фаза), воды (орошающая жидкость) и зерновой пыли (дисперсная фаза). Параметры газовой фазы приняты соответствующими воздуху при нормальных условиях. Характеристики дисперсной фазы определены на основе анализа фракционного состава пыли, образующейся при переработке зерна и производстве комбикормов, где преобладают частицы размером от 1 до 15 мкм. Плотность частиц пыли принята 1550 кг/м³. В качестве орошающей жидкости использована вода с плотностью 1000 кг/м³.

Методология исследования базировалась на разработке аналитических моделей, описывающих движение частиц в закрученном газовом потоке и процесс их захвата каплями орошающей жидкости. Расчет эффективности сепарации выполнялся отдельно для двух механизмов: центробежного и инерционного. Для оценки центробежной сепарации использовано уравнение равновесного радиуса движения капли, выведенное из баланса центробежной силы и силы аэродинамического сопротивления. Анализ инерционного осаждения проведен на основе уравнений массопереноса в цилиндрической системе координат с учетом взаимодействия частиц с вращающимся капельным слоем. При выводе расчетных зависимостей приняты следующие допущения: движение частицы в тангенциальном направлении происходит без проскальзывания относительно газового потока; толщина капельного слоя пренебрежимо мала по

сравнению с зоной поперечной сепарации; газовый поток движется через капельный слой в режиме идеального вытеснения; в условиях интенсивной крутки потока тангенциальная составляющая скорости капли преобладает над радиальной и осевой составляющими.

Условия моделирования определены исходя из типичных режимов работы аспирационных систем малых и средних предприятий АПК: расход газа фиксирован на уровне $G = 500$ кг/ч, диапазон расходов орошающей жидкости варьировался от $L = 21$ до 168 кг/ч, что соответствует соотношению расходов фаз L/G от 0,06 до 0,47. Геометрические параметры сепаратора (радиус рабочей зоны, высота, коэффициент крутки завихрителя $A = 0,8$) приняты постоянными для серии расчетов. Полученные расчетные зависимости эффективности сепарации при указанных параметрах приведены в следующем разделе.

Результаты и обсуждение. Для достижения поставленной цели выполнены расчеты эффективности центробежного и инерционного механизмов сепарации. Эффективность центробежной сепарации оценивалась на основе траектории движения частиц в закрученном газовом потоке в зоне поперечной сепарации устройства. В основу расчета положено допущение, что уносятся капли, имеющие равновесный радиус движения меньший, чем радиус их ввода в зону поперечной сепарации. Уравнение равновесного радиуса одиночной сферической капли r^* , движущейся в закрученном газовом потоке, выведено из условия баланса силы аэродинамического сопротивления и центробежной силы:

$$r^* = \frac{W_{\varphi,0}^2}{W_{r,0}\tau} = \frac{2\varepsilon_0^2 H}{\tau AR}, \quad (1)$$

где $W_{\varphi,0}$, $W_{r,0}$ – тангенциальная и радиальная скорости газа на периферии течения, м/с; ε_0 – коэффициент сохранения скорости на входе в устройство, определяется геометрией завихрителя, $\varepsilon_0 = W_{\varphi,0}/W_{\text{вх}} = 1$ для тангенциальных завихрителей; $W_{\text{вх}}$ – скорость газа в живом сечении завихрителя, м/с; R , H – радиус и высота рабочей зоны течения, м; $A = F_{\text{вх}}/(\pi R^2)$ – коэффициент крутки тангенциально-лопаточного завихрителя потока газа; τ – время релаксации частицы по Стоксу, рассчитываемое по формуле, с:

$$\tau = \frac{18\rho_z v_z}{\rho_c \delta_p^2}, \quad (2)$$

где ρ_z , ρ_c – плотности газа и капли жидкости, соответственно, кг/м³; v_z – кинематическая вязкость газа, м²/с; δ_p – диаметр частицы пыли, м.

Эффективность центробежного разделения определялась по формуле:

$$\eta_{\text{цб}} = \delta_p^2 / R^2. \quad (3)$$

Анализ инерционного осаждения частиц на каплях жидкости выполнен на основе уравнений массопереноса в цилиндрической системе координат, сопряженной с тангенциально-лопаточным завихрителем. В расчетной области выделен элементарный объем тороидальной формы с поперечными сторонами d_r и d_z (рис. 2). Количественное изменение массы дисперсной фазы dM в газовом потоке при его прохождении через данный объем описывается уравнением, м³/с:

$$dM = 2\pi r W_r \frac{dc_y}{dr} dr dz, \quad (4)$$

где W_r – радиальная скорость газа, м/с; c_y – концентрация дисперсной фазы в газовом потоке.

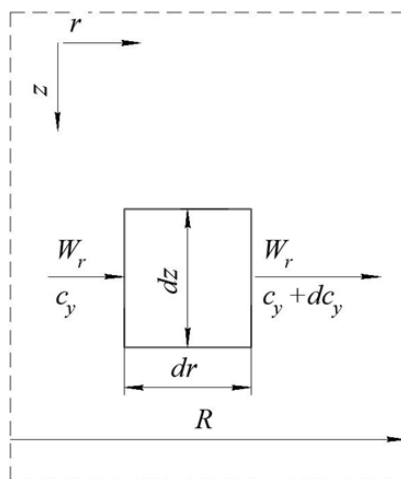


Рис. 2 – Расчетная схема
Fig. 2 – Calculation scheme

Концентрация дисперсной фазы определяется явлением захвата частиц каплями орошаемой жидкости и может быть записана в виде, м³/с:

$$dM = \eta_k v_k' c_y dF_k, \quad (5)$$

где η_k – эффективность захвата частиц одиночной каплей; dF_k – суммарная площадь миделева сечения капель в элементарном объеме, м²; v_k' – относительная скорость движения частицы, м/с.

Степень захвата одиночной каплей частиц дисперсной фазы рассчитывалась по эмпирической формуле [13], применяемой в практике расчета процесса мокрого пылеулавливания:

$$\eta_k = \frac{\text{Stk}}{\text{Stk} + 0,59L}, \quad (6)$$

где Stk – модифицированное число Стокса,

$$\text{Stk} = \frac{\rho_p \delta_p^2 v_k'}{18\rho_z v_z \delta_k};$$

L – параметр смачиваемости твердых частиц, $L \geq 1$.

Относительная скорость v_k' определялась как:

$$v_k' = \sqrt{(U_\varphi - V_\varphi)^2}, \quad (7)$$

где U_φ , V_φ – тангенциальные составляющие скорости частицы и капли, соответственно, м/с; $U_\varphi = W_{\varphi,0}$.

Суммарная площадь миделева сечения капель орошаемой жидкости dF_k связана с их массой в элементарном объеме:

$$dF_k = \frac{3}{2} \frac{dM_k}{\rho_c \delta_k}, \quad (8)$$

где dM_k – масса капель в элементарном объеме, рассчитываемая через среднemasсовую скорость жидкости $\tilde{V}_z$ и время движения t ,

$$dM_k = 2\pi \lambda t \tilde{V}_z r dr, \quad (9)$$

где $t = d_z/V_z$ – время, с; V_z – осевая скорость

капли в слое, м/с; $\tilde{V} \approx Lc/(2\pi Rbc)$ – скорость жидкости, м/с; bc – толщина капельного слоя, м; Lc – объемный расход жидкости в слое, м³/с; λ – коэффициент, учитывающий увеличение массы капель из-за их движения в тангенциальном направлении,

$$\lambda = \sqrt{1 + U_{\phi}^2 / U_r^2}.$$

На основе уравнений (4) и (5) было получено дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения концентрации частиц в газовом потоке по толщине капельного слоя:

$$dc_y / dr = Bc_y, \quad (10)$$

где коэффициент B находится по формуле:

$$B = \frac{3}{2} \frac{L}{G} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{(1-\chi)\epsilon_0}{\chi A} \eta_k \frac{H}{b\delta_k} \sqrt{1 + \frac{4\epsilon_0^2 H^2}{R^2 A^2}} \frac{H}{z} \frac{L}{\rho_c}, \quad (11)$$

где χ – коэффициент проскальзывания; G – расход газа, кг/с.

Интегрирование уравнения (10) с начальными условиями $r = R$; $c_y = c_{y,0}$ позволяет получить зависимость для определения концентрации частиц в газе

$$c_y = c_{y,0} e^{-B(R-r)}. \quad (12)$$

Концентрация твердых частиц в газовом потоке на выходе из сепарационного устройства находится по формуле:

$$c_{y,вых} = c_{y,0} e^{-Bb_c}. \quad (13)$$

При дополнительном допущении полного перемешивания жидкой фазы в поперечном направлении, на основе уравнения материального баланса было определено количество дисперсной фазы, переходящее из газовой в жидкую фазу в элементарном слое высотой dz ,

$$dM = \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{L}{G} \frac{dc_x}{dz} dz. \quad (14)$$

С учетом условия неразрывности газового потока было получено следующее выражение:

$$\frac{dc_x}{dz} = \frac{G}{L} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{c_y}{H} [1 - \exp(-Bb_c)]. \quad (15)$$

Интегрированием уравнения (15) при начальных условиях $z = z_0$; $c_x = c_{x,0}$ была найдена зависимость для концентрации частиц в жидкости по высоте капельного слоя:

$$c = c_{x,0} + \frac{G}{L} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{c_y}{H} \int_{z_0}^H [1 - \exp(-B(R-r))] dz, \quad (16)$$

и для концентрации частиц в жидкости на выходе из вихревого устройства:

$$c_{x,вых} = c_{x,0} + \frac{G}{L} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{c_y}{H} \int_{z_0}^H [1 - \exp(-Bb_c)] dz. \quad (17)$$

При оценке эффективности инерционной сепарации твердых частиц на каплях орошаемой жидкости необходимо найти долю дисперсной фазы, уносимой жидкостью, от исходного количества частиц в газе:

$$\eta_u = \frac{L}{G} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{(c_{x,вых} - c_{x,0})}{c_{y,0}}, \quad (18)$$

и определено уравнение для ее расчета:

$$\eta_u = \int_{z_0}^H (1 - e^{-T}) dz, \quad (19)$$

$$\text{где } T = \frac{3}{2} \frac{L}{G} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{(1-\chi)\epsilon_0}{\chi A} \eta_k \frac{H}{\delta_k} \sqrt{1 + \frac{4\epsilon_0^2 H^2}{R^2 A^2}} \frac{H}{z}.$$

Как и ожидалось, эффективность инерционной сепарации не зависит от начальной концентрации частиц в газовом потоке. Более существенным является наблюдение, что степень сепарации не коррелирует с толщиной вращающегося капельного слоя. Это явление объясняется следующим фактом, что количество улавливаемой дисперсной фазы определяется не геометрическими параметрами слоя, а интегральными характеристиками капельной среды: суммарным количеством капель, их суммарной поверхностью, которые, в свою очередь, зависят от трех ключевых факторов: расхода орошающей жидкости, дисперсного состава капель и их кинематических характеристик.

Уравнение (19) строго справедливо только для монофракционного состава капель в слое; при полидисперсном факеле используется средний объемно-поверхностный диаметр.

На основе полученных в результате расчета данных построены зависимости изменения эффективности центробежной сепарации и инерционного осаждения частиц при разном расходе жидкости.

Физический механизм выбора расхода жидкости как детерминирующего параметра на эффективность центробежной сепарации связан с тем, что подсаживаемая жидкость увеличивает потребление энергии вращательного потока газа. При постоянном расходе газа G увеличение массовой доли жидкости L относительно газа означает возрастание силы трения между фазами, что приводит к диссипации энергии вращения и снижению тангенциальной скорости газового потока. Одновременно, больший расход жидкости создает более плотный слой капель на периферии устройства, увеличивая вероятность столкновения мелких частиц с каплями (инерционный механизм). Таким образом, параметр L/G является критическим оптимизационным параметром, требующим компромисса между двумя конкурирующими механизмами разделения фаз.

Расчет фракционной эффективности центробежной сепарации по уравнению (3) показал (рис. 3), что центробежные силы обеспечивают практически полное отделение частиц размером свыше 10 мкм. С увеличением подачи орошающей жидкости происходит снижение крутки газового потока, что в свою очередь приводит к

снижению эффективности центробежной сепарации. Например, при $L/G = 0,12$ для частиц диаметром 10 мкм величина $\eta_{цб}$

достигает 80%, тогда как при $L/G = 0,23$ она падает до 50%, а при $L/G = 0,47$ составляет всего 18%.

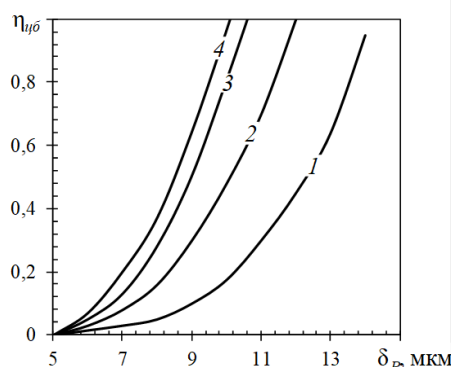


Рис. 3 – Зависимость эффективности центробежной сепарации от соотношения нагрузок по фазам L/G : 1 – 0,47; 2 – 0,23; 3 – 0,12; 4 – 0,06

Fig. 3 – Dependence of centrifugal separation efficiency on the liquid-to-gas phase load ratio (L/G): 1 – 0.47; 2 – 0.23; 3 – 0.12; 4 – 0.06

Расчеты по уравнению (19) при расходе газа $G = 500$ кг/ч и коэффициенте крутки $A = 0,8$ показали (рис. 4), что фракционная эффективность инерционной сепарации существенно зависит от расхода орошающей жидкости L . Эффективность инерционной сепарации η_i демонстрирует положительную корреляцию с увеличением диаметра частиц, асимптотически стремясь к предельным значениям, величина которых возрастает при повышении расхода орошающей жидкости. Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что для частиц диаметром свыше 4 мкм эффективность инерционного осаждения стабилизируется, достигая практически постоянных значений. Так, при расходе орошаемой жидкости $L = 21$ кг/ч максимальная эффективность улавливания не превышает 56%, тогда как увеличение расхода до 168 кг/ч приводит к ее росту до 94%. Отсутствие 100%-эффективности инерционного осаждения даже для крупных частиц обусловлено неполным перекрытием поперечного сечения сепарационного устройства каплями. При низких удельных расходах жидкости наблюдается уменьшение плотности капель

во вращающемся слое, что приводит к проскоку частиц и снижению эффективности сепарации запыленного потока газа. С увеличением расхода газа значение η_i снижается, так как время движения частиц в капельном слое сокращается.

Общая эффективность сепарации с учетом обоих механизмов может быть оценена предположением статистической независимости центробежного и инерционного эффектов. Таким образом, может быть применена широко используемая в практике пылеулавливания формула произведения вероятностей проскока частиц [14].

$$\eta_{\phi} = 1 - (1 - \eta_u)(1 - \eta_{цб}). \quad (20)$$

В рассматриваемом случае такой подход корректен при условии пренебрежения влиянием центробежного ускорения на движение частиц, что было учтено при выводе формулы (19). При известных значениях фракционной эффективности сепарации дисперсной фазы общая степень очистки газового потока может быть рассчитана методом весового суммирования фракционных эффективностей [14]:

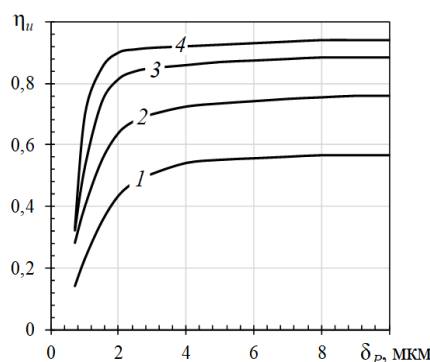


Рис. 4 – Зависимость эффективности инерционного осаждения частиц от нагрузки по жидкой фазе L , кг/ч: 1 – 21; 2 – 42; 3 – 84; 4 – 168; $G = 500$ кг/ч; $A = 0,8$; $\delta_k = 380$ мкм

Fig. 4 – Dependence of inertial particle deposition efficiency on the liquid phase load (L , kg/h): 1 – 21; 2 – 42; 3 – 84; 4 – 168; $G = 500$ kg/h; $A = 0.8$; $\delta_k = 380$ μ m

Таким образом, проведенный анализ выявил противоречивое влияние расхода орошающей жидкости L на общий процесс сепарации. С одной стороны, рост нагрузки по жидкой фазе подавляет центробежный механизм, снижая эффективность $\eta_{цб}$ для частиц диаметром ~ 10 мкм с 80% до 18%. С другой стороны, тот же рост L значительно усиливает инерционный механизм, повышая η_i для тех же частиц до 94%. Это указывает на наличие оптимального диапазона соотношения L/G , при котором суммарная эффективность сепарации (рассчитанная по формуле (20)) будет максимальной. Данный оптимум, по-видимому, смещен в сторону более высоких значений L/G , так как падение эффективности центробежной сепарации компенсируется резким ростом эффективности инерционного механизма осаждения частиц.

На основе проведенного анализа влияния режимных параметров на эффективность сепарации были сформулированы рекомендации по применению исследуемого устройства для конкретных технологических процессов агропромышленного комплекса.

Для зерносушилок и элеваторных комплексов, где преобладает крупнодисперсная пыль (свыше 10 мкм) при высоких температурах выбросов, рекомендуется работа с минимальным орошением при $L/G = 0,06-0,12$. Данные показывают, что в этом диапазоне эффективность центробежной сепарации для частиц 10 мкм максимальна и составляет 80–96%. Увеличение расхода жидкости нецелесообразно, так как оно снижает крутку потока и эффективность очистки от крупных фракций.

На комбикормовых заводах, где в процессах дробления, смешивания и гранулирования образуется мелкодисперсная пыль (5–10 мкм) с высоким содержанием белковых и минеральных компонентов, оптимальным является режим $L/G = 0,23-0,35$. Расчеты показывают, что суммарная эффективность улавливания частиц 5 мкм достигает 90–92%, что невозможно реализовать в сухих циклонах, где эффективность для данной фракции не превышает 30%. Использование мокрого метода также позволяет возвращать уловленную пыль в производство в виде влажной кормовой добавки, что повышает экономическую эффективность процесса.

Для мукомольного производства, характеризующегося высокой дисперсностью пыли (до 70% частиц менее 5 мкм) и повышенными требованиями к взрывобезопасности, рекомендуется работа при $L/G \geq 0,35$. При расходе жидкости 168 кг/ч эффективность инерционного осаждения даже для частиц 4 мкм достигает 92%, а для 10 мкм — 94%.

Это обеспечивает надежную санитарную очистку и взрывобезопасность процесса за счет смачивания частиц.

Выводы. Установлено, что эффективность центробежной сепарации в разработанном устройстве существенно зависит от соотношения нагрузок по фазам L/G . Увеличение расхода орошающей жидкости снижает крутку газового потока, что приводит к уменьшению степени очистки, особенно для частиц диаметром менее 10 мкм.

Доказано, что эффективность инерционной сепарации определяется главным образом расходом орошающей жидкости и дисперсным составом капель, тогда как геометрические параметры капельного слоя, такие как толщина и радиус, оказывают пренебрежимо малое влияние на процесс. Наибольшая степень очистки наблюдается для частиц пыли с диаметром, превышающим 4 мкм.

Показано, что комбинация центробежного и инерционного механизмов позволяет достичь высокой общей эффективности сепарации, что открывает возможности для оптимизации конструкции вихревых устройств без увеличения их габаритов.

Выявлен противоречивый характер влияния параметра L/G и на основе этого предложен подход к выбору режима работы: для очистки газа от крупных частиц (> 10 мкм) целесообразно использовать низкие соотношения L/G ($\leq 0,12$) для максимизации центробежной сепарации; для очистки от мелкодисперсной пыли (< 4 мкм) необходимо увеличивать L ($L/G \geq 0,23$) для интенсификации инерционного механизма; при обработке полидисперсной пыли рекомендуется выбирать промежуточные значения L/G в диапазоне 0,15–0,20.

Обосновано, что предложенное газожидкостное сепарационное устройство является перспективным для модернизации систем аспирации предприятий АПК (элеваторы, комбикормовые заводы и др.) благодаря компактности конструкции, возможности возврата уловленного продукта в технологический цикл и повышенной взрывобезопасности по сравнению с сухими методами очистки.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

Литература

1. Иванов А.Г., Ширококов В.И., Калимуллин М.Н. Зависимость частоты вращения лопастей мешалки мокрого пылеуловителя от плотности жидкости // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 3(67). С. 77–83. doi: 10.12737/2073-0462-2022-81-87.
2. Tian C., Yang Z., Zhang L. A review of grain dust explosions: Prevention and control // Results in Engineering. 2025. Vol. 26. Article 105483. doi: 10.1016/j.rineng.2025.105483.

3. Zhao J.P., Tang G.F., Wang Y.C., Han Y. Explosive property and combustion kinetics of grain dust with different particle sizes // *Heliyon*. 2020. Vol. 6. Issue 3. Article e03457. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03457.
4. Dziubak T., Dziubak S. A study on the effect of inlet air pollution on the engine component wear and operation // *Energies*. 2022. Vol. 15. Article 1182. doi: 10.3390/en15031182.
5. Небытов В.Г. Воздействие пылевого фактора на условия труда работников АПК // *Охрана и экономика труда*. 2015. № 2(19). С. 89–93.
6. Рудыка Е.А., Батурина Е.В. Анализ пылеочистного оборудования, используемого при производстве растворимых порошков // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2016. № 2(68). С. 193–196. doi: 10.20914/2310-1202-2016-2-193-196.
7. Dziubak S., Dziubak T. Experimental study of an axial flow cyclone with ongoing dust removal from a settling tank // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2025. Vol. 209. Article 110167. doi: 10.1016/j.cep.2025.110167.
8. Красовицкий Ю.В., Федорова М.Н, Архангельская Е.В., Логинов А.В. Особенности фильтрования технологических газов и аспирационных выбросов зернистыми слоями в пищевой технологии // *Вестник Воронежской государственной технологической академии*. 2010. № 1(43). С. 83–86.
9. Панова О.Д., Красовицкий Ю.В., Панов С.Ю. Фильтр с динамической регенерацией для улавливания и утилизации пылевых выбросов при хранении и переработке зерна // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2007. № 8. С. 67–69.
10. Скорик Т.А., Глазунова Е.К., Галкина Н.И. Оценка эффективности работы мокрых пылеулавливающих аппаратов // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 2(49). С. 132–140.
11. Харьков В.В., Николаев А.Н. Инженерная методика расчета вихревой камеры со взвешенным капельным слоем // *Химическая промышленность сегодня*. 2017. № 1. С. 16–21.
12. Николаев А.Н., Нуртдинов Н.М., Харьков В.В. Эффективность инерционного осаждения частиц на каплях жидкости в полых вихревых аппаратах при очистке выбросов пищевых производств // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 3. С. 294–296.
13. Литвинов А.Т. Об оценке эффекта захвата крупными частицами или каплями жидкости мелких частиц и о влиянии гидрофильности частиц на коэффициент захвата // *Инженерно-физический журнал*. 1969. Т. 16. № 6. С. 1052–1061.
14. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Л.: Химия, 1982. 256 с.

References

1. Ivanov AG, Shirobokov VI, Kalimullin MN. [Dependence of the rotation frequency of the wet dust collector mixer blades on the liquid density]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022; Vol.17. 3 (67). 77-83 p. doi: 10.12737/2073-0462-2022-81-87.
2. Tian C, Yang Z, Zhang L. A review of grain dust explosions: prevention and control. *Results in Engineering*. 2025; Vol.26. Article 105483. doi: 10.1016/j.rineng.2025.105483.
3. Zhao JP, Tang GF, Wang YC, Han Y. Explosive property and combustion kinetics of grain dust with different particle sizes. *Heliyon*. 2020; Vol.6. Issue 3. Article e03457. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03457.
4. Dziubak T, Dziubak S. A study on the effect of inlet air pollution on the engine component wear and operation. *Energies*. 2022; Vol.15. Article 1182. doi: 10.3390/en15031182.
5. Nebytov VG. [Impact of the dust factor on working conditions of workers in the agro-industrial complex]. *Okhrana i ekonomika truda*. 2015; 2(19). 89-93 p.
6. Rudyka EA, Baturina EV. [Analysis of dust cleaning equipment used in the production of soluble powders]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*. 2016; 2(68). 193-196 p. doi: 10.20914/2310-1202-2016-2-193-196.
7. Dziubak S, Dziubak T. Experimental study of an axial flow cyclone with ongoing dust removal from a settling tank. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2025; Vol.209. Article 110167. doi: 10.1016/j.cep.2025.110167.
8. Krasovitskiy YuV, Fedorova MN, Arkhangelskaya EV, Loginov AV. [Features of filtration of process gases and aspiration emissions by granular layers in food technology]. *Vestnik Voronezhskoy gosudarstvennoy tekhnologicheskoy akademii*. 2010; 1(43). 83-86 p.
9. Panova OD, Krasovitskiy YuV, Panov SYu. [Filter with dynamic regeneration for capturing and recycling dust emissions during grain storage and processing]. *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya*. 2007; 8. 67-69 p.
10. Skorik TA, Glazunova EK, Galkina NI. [Evaluation of wet dust collecting devices efficiency]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2018; 2(49). 132-140 p.
11. Kharkov VV, Nikolaev AN. [Engineering methodology for calculating a vortex chamber with a suspended droplet layer]. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya*. 2017; 1. 16-21 p.
12. Nikolaev AN, Nurtidinov NM, Kharkov VV. [Efficiency of inertial sedimentation of particles on liquid droplets in hollow vortex apparatus for cleaning food production emissions]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2015; Vol.18. 3. 294-296 p.
13. Litvinov AT. [On assessing the effect of capture small particles by large particles or liquid droplets and the influence of particle hydrophilicity on the capture efficiency]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 1969; Vol.16. 6. 1052-1061 p.
14. Kouzov PA, Malgin AD, Skryabin GM. [Cleaning dust from gases and air in the chemical industry]. *Leninograd: Khimiya*. 1982; 256 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Харьков Виталий Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования пищевых производств Казанского национального исследовательского технологического университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, улица Карла Маркса, 68), e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID 0000-0002-8219-7323

Николаев Андрей Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования пищевых производств Казанского национального исследовательского технологического университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, улица Карла Маркса, 68), e-mail: andr_nik_nik@rambler.ru, ORCID 0000-0002-0714-2613

Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и оборудования в агробизнесе Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: zigan66@mail.ru, ORCID 0000-0003-2129-2631

Вклад авторов:

В. В. Харьков – концепция и постановка исследования, разработка методологии, проведение исследований и экспериментов, формальный анализ данных, визуализация результатов, подготовка первоначального варианта рукописи, администрирование проекта;

А. Н. Николаев – разработка и уточнение методологии исследования, валидация и проверка воспроизводимости результатов, обеспечение ресурсов и оборудования, научное руководство, критический пересмотр текста и научное редактирование;

Б. Г. Зиганшин – формальный анализ и интерпретация результатов, проверка корректности расчётов и выводов, критический пересмотр и литературное редактирование рукописи.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 03.12.2025; одобрена после рецензирования 24.02.2026; принята к публикации 01.04.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Authors:

Kharkov Vitaliy Viktorovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Food Production Equipment Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID 0000-0002-8219-7323

Nikolaev Andrey Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Food Production Equipment Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: andr_nik_nik@rambler.ru, ORCID 0000-0002-0714-2613

Ziganshin Bulat Gusmanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Machinery and Equipment in Agribusiness Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: zigan66@mail.ru, ORCID 0000-0003-2129-2631

Contribution of the authors:

V.V. Kharkov – Research concept and design, Methodology development, Conducting research and experiments, Formal data analysis, Results visualization, Drafting the manuscript, Project administration;

A.N. Nikolaev – Methodology development and refinement, Validation and verification of result reproducibility, Provision of resources and equipment, Scientific supervision, Critical review of the text and scientific editing;

B.G. Ziganshin – Formal analysis and interpretation of results, Verification of calculation accuracy and conclusions, Critical review and literary editing of the manuscript.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 03.12.2025; revised 24.02.2026; accepted 01.04.2026.

