

М.А. Прец

В.Э. Зинуров ✉

Казанский государственный
энергетический университет, Казань,
Россия

✉ vadd_93@mail.ru

Поступила в редакцию: 24.02.2026

Одобрена после рецензирования: 17.07.2026

Принята к публикации: 01.08.2026

© Прец М.А., Зинуров В.Э.

Оценка геометрического масштабирования мультивихревого воздушного классификатора для линий переработки пищевых порошков

РЕЗЮМЕ

Контроль гранулометрического состава мелкодисперсных порошкообразных материалов является важной инженерной задачей для АПК и пищевых производств, поскольку влияет на устойчивость технологических режимов, качество смешения, точность дозирования и уровень запыленности. Традиционные способы разделения частиц в области размеров менее 100 мкм часто ограничены по селективности и производительности, что определяет необходимость разработки новых аппаратов сухой воздушной классификации. В работе предложен мультивихревой воздушный классификатор, обеспечивающий селективное разделение и частичное обеспыливание порошков без изменения их влажности. Целью исследования стала количественная оценка влияния геометрического масштабирования аппарата и скорости входного газа на показатели разделения частиц, характерных для материалов агропромышленного и пищевого назначения. Исследование выполнено методом вычислительной гидродинамики в программном комплексе ANSYS Fluent с лагранжевым моделированием дисперсной фазы. Рассмотрены скорости входного потока 1–15 м/с и масштабы конструкции 0,5–8 относительно базового типоразмера. Показано, что при увеличении геометрического масштаба аппарата диаметр граничного зерна смещается в область более крупных частиц, а селективность разделения снижается. Установлено, что повышение скорости входного газа до 10–15 м/с способствует формированию более резкого разделения и повышению селективности, что делает указанный диапазон скоростей предпочтительным для практического применения аппарата в режиме классификации. Потери давления в исследованном диапазоне режимов остаются умеренными и не превышают 550 Па. Полученные результаты подтверждают перспективность использования мультивихревого классификатора в линиях кормопроизводства, подготовки премиксов и сухих пищевых ингредиентов.

Ключевые слова: мультивихревой классификатор, воздушная классификация, сухое фракционирование, мелкодисперсные порошки, фракционная эффективность, геометрическое масштабирование, селективность разделения, порошковые пищевые материалы

Для цитирования: Прец М.А., Зинуров В.Э. Оценка геометрического масштабирования мультивихревого воздушного классификатора для линий переработки пищевых порошков. *Аграрная наука*. 2026; 409 (08): 160–167.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-409-08-160-167>

Assessment of geometric scaling of a multi-vortex air classifier for food powder processing lines

ABSTRACT

Control of the particle size distribution of fine powdered materials is an important engineering task for the agro-industrial sector and food processing, since it affects process stability, mixing quality, dosing accuracy, and dust generation levels. Conventional particle separation methods for sizes below 100 µm are often limited in selectivity and throughput, which creates a need for new dry air classification devices. In this study, a multi-vortex air classifier is proposed to provide selective separation and partial dedusting of powders without changing their moisture content. The aim of the study was to quantitatively assess the influence of geometric scaling of the apparatus and inlet gas velocity on particle separation performance for materials typical of agro-industrial and food applications. The study was carried out using computational fluid dynamics in ANSYS Fluent with Lagrangian modeling of the dispersed phase. Inlet gas velocities of 1–15 m/s and scale factors of 0.5–8 relative to the base design were considered. It is shown that increasing the geometric scale of the classifier shifts the cut size toward larger particles and reduces separation selectivity. It was found that increasing the inlet gas velocity to 10–15 m/s promotes a sharper separation transition and improves selectivity, making this velocity range preferable for practical operation of the classifier in classification mode. Pressure losses remain moderate over the studied operating range and do not exceed 550 Pa. The obtained results confirm the potential of the multi-vortex classifier for feed production lines, premix preparation, and dry food ingredient processing.

Key words: multi-vortex classifier, air classification, dry fractionation, fine powders, fractional efficiency, geometric scaling, separation selectivity, powdered food materials

For citation: Prets M.A., Zinurov V.E. Assessment of geometric scaling of a multi-vortex air classifier for food powder processing lines. *Agrarian science*. 2026; 409 (08): 160–167 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-409-08-160-167>

Mariia A. Prets

Vadim E. Zinurov ✉

Kazan State Power Engineering
University, Kazan, Russia

✉ vadd_93@mail.ru

Received by the editorial office: 24.02.2026

Accepted in revised: 17.07.2026

Accepted for publication: 01.08.2026

© Prets M.A., Zinurov V.E.

Введение/Introduction

Контроль гранулометрического состава порошкообразных материалов является технологически значимым для широкого круга операций АПК и пищевых производств, где качество продукта и стабильность процесса зависят от доли тонкой и целевой фракций [1–3]. При этом размерный состав порошка непосредственно определяет его сыпучесть и склонность к сводообразованию в бункерах, точность дозирования и воспроизводимость подачи в смесители, однородность распределения функциональных добавок в премиксах и сухих композициях, а также интенсивность пылеобразования при транспортировании и фасовке [4–6]. Для ряда органических, микрокапсулированных, пищевых и кормовых порошков эти эффекты проявляются особенно заметно вследствие высокой аэродинамической чувствительности частиц и возрастания роли межчастичных взаимодействий, зависящих от дисперсности, формы и поверхностных свойств [7, 8]. В результате задача управляемого сухого фракционирования приобретает инженерный смысл как задача обеспечения устойчивой работы технологических линий при одновременном снижении потерь продукта и нагрузок на системы аспирации и пылеулавливания [9].

В производственных условиях основная проблема состоит в том, что традиционные решения для разделения по крупности в области мелкодисперсных частиц, как правило, менее 100 мкм, часто оказываются либо недостаточно производительными, либо нестабильными по качеству фракции при изменении влажности, исходной дисперсности и склонности материала к агломерации. Ситовая классификация в зоне малых размеров ограничивается снижением пропускной способности при формировании плотного слоя на поверхности, а также явлениями засорения и забивания апертур, что приводит к дрейфу характеристик и росту времени обработки [10]. Мокрые методы разделения в ряде случаев обеспечивают более узкое фракционирование, однако требуют введения жидкости и последующих операций обезживания и сушки, что увеличивает энергоемкость и усложняет санитарно-гигиенические и технологические требования, поэтому для линий сухих смесей и сухих ингредиентов их применение ограничено [11]. В связи с этим актуальными становятся сухие методы разделения в воздушном потоке, включая воздушную классификацию и другие варианты сухого фракционирования, позволяющие получать фракции без изменения влажности и без перехода к схемам с энергоемкой сушкой [12–15].

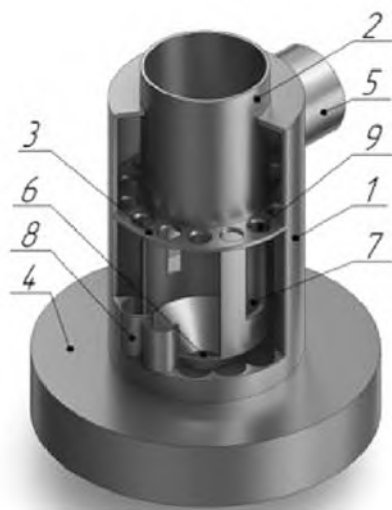
На практике для сухого разделения порошков в воздушном потоке используют несколько классов аппаратов и схем. Циклонные и мультициклонные устройства отличаются простотой, устойчивостью к запыленности и сравнительно невысокими эксплуатационными затратами, однако при работе с мелкодисперсными фракциями (как правило,

менее 100 мкм) их возможности по селективному разделению ограничены, а повышение эффективности нередко сопровождается ростом потери давления и усложнением конструкции [16]. Зигзагообразные и гравитационно-пневматические каналы применяются в операциях пневмосепарации и очистки зернового материала, однако при переходе к тонкодисперсным порошкам возрастают требования к равномерности питания и стабильности расхода воздуха, а также усиливается влияние когезии, формы частиц и агломерации, что снижает воспроизводимость качества разделения [17–19]. Центробежные воздушные классификаторы роторного типа способны обеспечивать более тонкое фракционирование и непрерывность процесса, но требуют точной настройки аэродинамического режима и устойчивой дисперсии подачи, а также могут характеризоваться повышенными потерями давления, что увеличивает энергопотребление вентиляции и нагрузку на аспирацию [20–23]. Для пищевых и кормовых производств дополнительно значимы требования по снижению запыленности и минимизации выбросов, поскольку тонкая фракция влияет на санитарные условия, потери продукта и безопасность, включая риски пылевых пожаров и взрывов при обращении с горючими пылящими материалами [24–26]. Совокупность указанных ограничений определяет актуальность разработки новых аппаратов воздушной классификации и модернизации существующих схем сухого фракционирования, ориентированных на устойчивое качество разделения при приемлемых энергозатратах.

Авторами статьи предлагается разработанная модель мультивихревого воздушного классификатора (см. рис. 1). В аппарате фракционирование происходит за счет совместного действия аэродинамических и центробежных сил в закрученном восходящем потоке, формируемом в кольцевом рабочем канале между корпусом 1 и внутренней соосной трубой 2 [27]. Газопылевая смесь подается в аппарат через трубу 2, далее поток разделяется на две составляющие. Часть газа через отверстия 7, ориентированные под углом к горизонтали, перетекает в кольцевое пространство и образует тангенциальные струи, которые иницируют систему устойчивых вихревых ячеек [28]. Для стабилизации вихревой структуры и уменьшения межзонного переноса частиц в кольцевом канале установлены дугообразные направляющие элементы 8, задающие организованное движение дисперсной фазы в пределах каждой вихревой зоны. Оставшаяся часть потока продолжает движение по центральному каналу вниз, в области конического днища 6 разворачивается и формирует восходящий осевой поток, направленный к выходному патрубку 5. Вихревая структура в кольцевом канале и осевой восходящий поток обеспечивают селективное разделение: укрупненные частицы преимущественно смещаются к периферии, теряют

Рис. 1. Мультивихревой воздушный классификатор (вид с разрезами): 1 — корпус; 2 — внутренняя соосная труба ввода газопылевой смеси; 3 — экран; 4 — пылесборный бункер; 5 — патрубок вывода очищенного газа и тонкой фракции; 6 — коническое днище; 7 — отверстия для формирования тангенциальных струй; 8 — дугообразные направляющие элементы; 9 — радиальные отверстия (переточные каналы) для стабилизации режима¹

Fig. 1. Multi-vortex air classifier (sectional view): 1 — housing; 2 — inner coaxial inlet pipe for the gas-particle mixture; 3 — baffle (screen); 4 — dust collection hopper; 5 — outlet nozzle for the cleaned gas and the fine fraction; 6 — conical bottom; 7 — openings for generating tangential jets; 8 — arcuate guide vanes; 9 — radial openings (transfer channels) for flow-regime stabilization



скорость и выводятся в пылесборную зону 4, тогда как более легкая и тонкая фракция уносится восходящим потоком и выводится через патрубок 5. Для выравнивания распределения расхода и стабилизации гидродинамики в рабочей зоне предусмотрены радиальные отверстия 9, а экран 3 выполняет функцию локализации и экранирования зоны вихреобразования, снижая влияние входных возмущений на структуру потока и воспроизводимость разделения.

Актуальной задачей является адаптация предлагаемого мультивихревого воздушного классификатора к таким геометрическим параметрам, которые обеспечивают селективное выделение требуемых фракций с характерными размерами частиц менее 100 мкм при работе с порошкообразными материалами агропромышленного и пищевого назначения, включая сухие кормовые компоненты, премиксы и порошковые пищевые ингредиенты.

Целью работы является количественная оценка влияния геометрического масштабирования мультивихревого классификатора на достижимость узкого фракционного состава указанных материалов, предназначенных для последующих операций дозирования, смешения и пневмотранспортирования в технологических линиях АПК.

Материал и методы исследования / Material and methods

Оценка влияния геометрического масштабирования на характеристики разделения в мультивихревом воздушном классификаторе выполнялась методом вычислительной гидродинамики. В качестве базовой геометрии принят типоразмер $M = 1$, для которого диаметр внутренней трубы подачи газопылевого потока составлял 40 мм, внутренний диаметр корпуса 74 мм, ширина кольцевого рабочего зазора 15 мм, высота щелевых элементов 28 мм. Масштабирование осуществлялось геометрически подобным образом путем умножения всех линейных размеров базовой модели на коэффициент M . В ходе работы были рассмотрены значения $M = 0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 8$. Значения коэффициента масштабирования M были выбраны как параметрический ряд, охватывающий широкий диапазон геометрически подобных типоразмеров аппарата, что позволило оценить влияние масштаба на характеристики разделения в условиях геометрически подобного изменения конструкции.

Расчетную сетку формировали на основе полиэдрических ячеек с призматическими слоями в пристеночной области для корректного разрешения пограничного слоя и касательных напряжений. Сеточную независимость контролировали по стабилизации интегральных показателей, включая потери давления и фракционную эффективность, при последовательном измельчении сетки. Газовую фазу рассчитывали в стационарной постановке на основе уравнений RANS для несжимаемой среды. Для замыкания турбулентности применяли модель $k-\omega$ SST, адекватную для закрученных течений с выраженными градиентами скорости и возможными зонами отрыва [29].

Дисперсную фазу моделировали в лагранжевой постановке с использованием Discrete Phase Model (DPM)² [30]. Частицы вводили как монодисперсные фракции с диаметрами $d = 1-100$ мкм. Плотность частиц в расчетах принимали равной $\rho_d = 1000$ кг/м³ как репрезентативное значение для ряда порошкообразных материалов агропромышленного и пищевого назначения, близких по плотности к водным и органическим дисперсным фазам. К этой группе относятся, в частности, крахмалсодержащие порошки и мукомольные продукты, а также многие сахаросодержащие и белково-углеводные смеси, порошковые кормовые компоненты и премиксы на основе органических носителей, включая композиции с микрокапсулированными добавками (витаминно-минеральные и функциональные ингредиенты), для которых характерны плотности порядка $(0,9-1,3) \cdot 10^3$ кг/м³ в зависимости от пористости,

¹ Прец М.А., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Вдовина В.А. Патент RU 238025 U1, Российская Федерация. Мультивихревой пылеуловитель-классификатор. Опубликовано 16.10.2025.

² ANSYS, Inc. Ansys Fluent Theory Guide. Release 2025 R1. 2025.

влажности и рецептуры. При малой объемной доле твердой фазы использовали допущение одностороннего взаимодействия фаз, при котором движение частиц определяется полем скоростей газовой фазы.

В качестве граничных условий на входе во внутреннюю трубу задавали скорость газа $W = 1\text{--}15$ м/с. На выходном сечении расчетной области задавали условие фиксированного статического давления, соответствующего атмосферному. На нижней поверхности пылесборной зоны задавали улавливание частиц, на остальных стенках принимали отражение частиц. Потери давления определяли как разность массово-усредненных полных давлений между входом и выходом расчетной области.

Качество разделения оценивали по фракционной эффективности $E(d)$, определяемой как отношение числа частиц, попавших в пылесборную зону, к общему числу введенных частиц для каждой монодисперсной фракции. Для параметрического описания S-образных зависимостей $E(d)$ применяли логистическую аппроксимацию с учетом возможного неселективного проскока части потока (1).

$$E = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + e^{-k_c(d-d_{50c})}}, \quad (1)$$

где E_0 и E_∞ — нижняя и верхняя асимптота логистической кривой соответственно.

Параметры аппроксимирующей зависимости определяли методом наименьших квадратов по дискретным расчетным значениям $E(d)$, полученным для отдельных монодисперсных фракций.

По аппроксимированной зависимости (2) определяли скорректированный диаметр граничного зерна d_{50c} , соответствующий размеру частиц, для которого скорректированная фракционная эффективность достигает уровня 0,5 (половина частиц данного размера улавливается, а половина покидает аппарат), и параметр кривизны k_c , характеризующий крутизну S-образного перехода на кривой $E(d)$ (чем больше k_c , тем резче разделение и тем уже переходная зона по крупности).

$$E_c = \frac{1}{1 + e^{-k_c(d-d_{50c})}}, \quad (2)$$

Резкость разделения характеризовали индексом S_c , вычисляемым через характерные размеры частиц d_{75c} и d_{25c} , соответствующие уровням эффективности 0,25 и 0,75 на скорректированной кривой (3).

$$S_c = \frac{d_{75c}}{d_{25c}}, \quad (3)$$

Результаты и обсуждение / Results and discussion

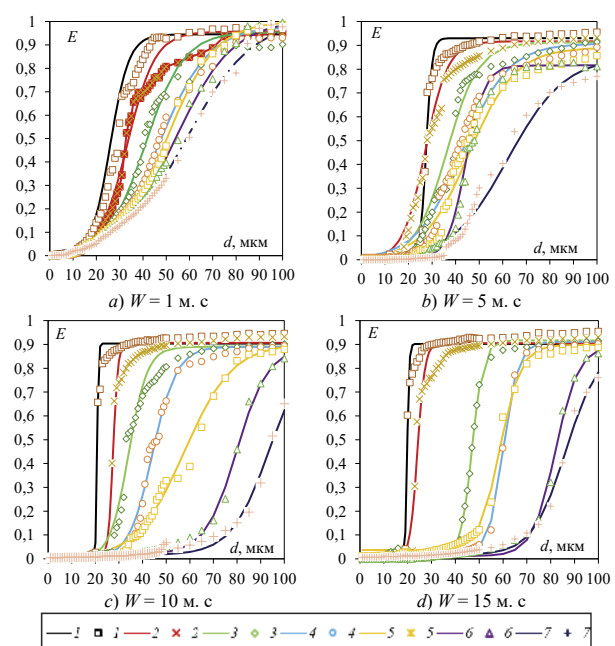
Результаты численного моделирования (см. рис. 2–5) показали, что геометрическое масштабирование и режим по скорости входного газа совместно определяют положение разделительного размера и селективность работы мультивихревого воздушного классификатора. В целом увеличение масштаба M приводит к смещению переходной области разделения в сторону более крупных частиц и снижению резкости разделения, тогда как повышение скорости W (особенно при $W \geq 10$ м/с) способствует формированию более выраженного перехода на кривых $E(d)$.

Зависимости фракционной эффективности $E(d)$ для частиц плотностью $\rho_d = 1000$ кг/м³ имеют выраженный S-образный вид. При малых размерах d эффективность близка к нулю, далее следует переходная область, после чего формируется верхнее плато E_∞ . При увеличении масштаба M переходная область систематически смещается в сторону больших d , а крутизна кривой, как правило, снижается, что соответствует ухудшению селективности разделения (см. рис. 2, а–д).

При скорости входного газа $W = 1$ м/с реализуется режим с минимальной интенсивностью аэродинамического воздействия, при котором верхнее плато E_∞ кривых $E(d)$ для всех масштабов сохраняется высоким. Для малых типоразмеров $M = 0,5\text{--}1$ рост эффективности начинается при меньших d , и переходная область располагается левее по сравнению с крупными масштабами. При увеличении масштаба до $M = 6\text{--}8$ переходная область $E(d)$ смещается в область больших d , что означает

Рис. 2. Фракционная эффективность $E(d)$ мультивихревого воздушного классификатора при различных масштабах M (1 — 0,5; 2 — 1; 3 — 2; 4 — 3; 5 — 4; 6 — 6; 7 — 8) и скоростях газа на входе W , м. с

Fig. 2. Fractional efficiency $E(d)$ of the multi-vortex air classifier at different scale factors M (1 — 0,5; 2 — 1; 3 — 2; 4 — 3; 5 — 4; 6 — 6; 7 — 8) and inlet gas velocities W , m. s



снижение эффективности улавливания частиц при фиксированной скорости W . С инженерной точки зрения это неблагоприятно для режима пылеулавливания, поскольку приводит к росту доли частиц, уносимых через выход тонкой фракции, а в режиме классификации сопровождается сдвигом разделительного размера в сторону укрупнения и, как правило, уменьшением резкости перехода, что ограничивает возможность получения узких фракций (см. рис. 2, а).

При увеличении скорости до $W = 5$ м/с, как показано на рис. 2, б, влияние масштабирования проявляется отчетливее. Для $M = 0,5$ –2 S-образные кривые сохраняют высокую крутизну переходной области, а рост $E(d)$ начинается при меньших d . Для $M = 3$ –4 переходная область смещается к более крупным размерам, при $M = 6$ –8 переходная область переносится вправо и становится более протяженной.

Важно отметить, что по сравнению с режимом $W = 1$ м/с при $W = 5$ м/с в целом наблюдается тенденция к повышению резкости разделения (см. рис. 2, а), что проявляется в более крутом переходе S-образных зависимостей $E(d)$ и формировании более узкой переходной зоны по крупности.

При скоростях $W = 10$ –15 м/с (см. рис. 2, с и d) различия между масштабами проявляются наиболее отчетливо. Для малых типоразмеров $M = 0,5$ –1 переход к верхнему плато происходит быстрее и при меньших размерах d , тогда как при $M = 2$ –4 переходная область смещается в сторону более крупных частиц и становится более протяженной. Для крупных масштабов $M = 6$ –8 рост $E(d)$ замедляется.

Принципиально важно, что при $W \geq 10$ м/с (см. рис. 2, с и d) S-образные зависимости приобретают более выраженную переходную область относительно $W \leq 5$ м/с (см. рис. 2, а и б), что можно связать с интенсификацией вихревых структур в кольцевом канале и, как следствие, с усилением разделяющего действия поля скоростей. В этих режимах для каждого масштаба становится возможным устойчиво идентифицировать характерные размеры разделения, что является практическим преимуществом. С одной стороны, повышается потенциал получения узких гранулометрических фракций, с другой стороны появляется возможность прогнозного подбора геометрии аппарата под заданную технологическую задачу на основе расчетных параметров.

Геометрическое масштабирование аппарата приводит к систематическому росту d_{50c} при всех рассмотренных значениях W , т. е. переходная область разделения смещается в сторону более крупных частиц при увеличении типоразмера (см. рис. 3).

При скорости $W = 1$ м/с увеличение масштаба M от 0,5 до 8 сопровождается ростом d_{50c} с 25,97 до 58,98 мкм. При $W = 5$ м/с характер изменения близок d_{50c} возрастает от 27,51 до 62,36 мкм, при этом

в области малых масштабов $M = 0,5$ –1 значения практически не различаются, а основной прирост проявляется при $M \geq 2$. Для $W = 10$ м/с влияние масштабирования становится существенно более выраженным: d_{50c} увеличивается от 20,75 мкм при $M = 0,5$ до 93,40 мкм при $M = 8$. Аналогичная тенденция наблюдается при $W = 15$ м/с, где d_{50c} возрастает от 19,83 до 86,30 мкм.

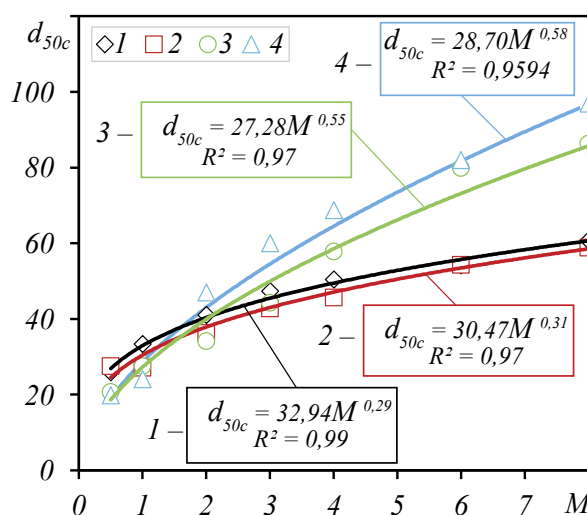
Сопоставление кривых на рис. 3 показывает, что чувствительность d_{50c} к масштабу зависит от скорости входного потока. Для $W = 1$ –5 м/с рост d_{50c} при переходе от $M = 0,5$ к $M = 8$ составляет порядка 2,3 раза, тогда как для $W = 10$ –15 м/с увеличение достигает 4,3–4,5 раза. Следовательно, при $W \geq 10$ м/с масштабирование оказывает более сильное влияние на положение разделительного размера, что согласуется с отмеченной выше интенсификацией вихревых структур и усилением роли траекторного переноса частиц в кольцевом канале (см. рис. 3).

Параметр кривизны логистической зависимости k_c в целом уменьшается при увеличении масштаба M для всех рассмотренных скоростей входного газа. Это соответствует расширению переходной области на кривых $E(d)$ и, следовательно, снижению селективности разделения при геометрическом укрупнении аппарата (см. рис. 4).

При $W = 1$ м/с наблюдается монотонное снижение k_c при изменении масштаба $M = 0,5$ –8 от 0,247 до 0,0718. При $W = 5$ м/с тенденция аналогична: k_c уменьшается от 0,802 до 0,0833, причем наиболее заметное снижение приходится на переход от малых масштабов $M = 0,5$ –1 к $M = 2$ –3, тогда как при $M \geq 3$ изменение k_c становится более плавным. Для $W = 10$ м/с зависимость выражена наиболее резко. При $M = 0,5$ k_c достигает 3,42, затем уменьшается до 0,97, при $M = 1$ и до 0,252 при

Рис. 3. Зависимость диаметра граничного зерна d_{50c} от масштаба M при различных скоростях входного газа W , м/с: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15

Fig. 3. Dependence of the corrected cut size d_{50c} on the scale factor M at different inlet gas velocities W , m/s: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15



$M = 2$. Дальнейшее увеличение масштаба значения стабилизируются на уровне порядка 0,1–0,2, достигая 0,126 при $M = 8$. Для $W = 15$ м/с k_c также уменьшается с ростом M .

Сопоставление режимов показывает, что зависимость $k_c(M)$ носит нелинейный характер и наиболее чувствительна к масштабированию в области малых M , особенно при повышенных скоростях входного газа. Иными словами, при переходе от $M = 0,5$ к $M = 1$ –2 происходит наиболее заметное изменение крутизны кривых $E(d)$, тогда как при дальнейшем геометрическом масштабировании аппарата снижение k_c становится более плавным. Для обобщения масштабного эффекта зависимости $k_c(M)$, полученные для каждого значения W , аппроксимировали степенными законами с удовлетворительным согласованием с расчетными данными. В совокупности результаты, как показано на рис. 4, подтверждают, что увеличение типоразмера аппарата приводит к уменьшению резкости перехода кривых $E(d)$, а влияние режима по скорости проявляется прежде всего в интенсивности изменения $k_c(M)$ на малых масштабах M .

Индекс резкости S_c характеризует ширину переходной зоны на кривых $E(d)$: чем ближе S_c к 1, тем селективнее разделение. По данным рис. 5 видно, что влияние масштаба M на S_c носит устойчивый характер. При увеличении M индекс S_c , как правило, возрастает, что соответствует ухудшению резкости разделения (расширению переходной области). Одновременно повышение скорости входного газа приводит к снижению S_c и, следовательно, к росту селективности, что согласуется с более резким видом S-образных зависимостей при $W \geq 10$ м/с (см. рис. 5).

В численном выражении для $W = 1$ м/с S_c принимает наибольшие значения 1,41–1,70, указывая на наименее селективный режим. При $W = 5$ м/с значения S_c в целом выше при крупных масштабах и достигают порядка 1,1–1,6, причем наиболее заметное изменение связано с переходом от малых типоразмеров к средним. Для $W = 10$ и 15 м/с S_c остается ближе к 1 (около 1,03–1,36 и $\approx 1,05$ –1,19 соответственно).

В исследованном диапазоне режимов гидравлическое сопротивление мультивихревого классификатора, рассчитанное как разность массово-усредненных полных давлений между входом и выходом расчетной области, остается умеренным и при $W = 15$ м/с не превышает 550 Па.

Практическая проекция полученных результатов на агропромышленный комплекс и пищевые технологии заключается в том, что мультивихревой классификатор может рассматриваться как настраиваемый узел сухой воздушной классификации, совмещающий функции фракционирования и частичного обеспыливания без изменения влажности материала. Установленные

Рис. 4. Зависимость параметра кривизны k_c от масштаба M при различных скоростях входного газа W , м/с: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15

Fig. 4. Dependence of the curvature parameter k_c on the scale factor M at different inlet gas velocities W , m/s: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15

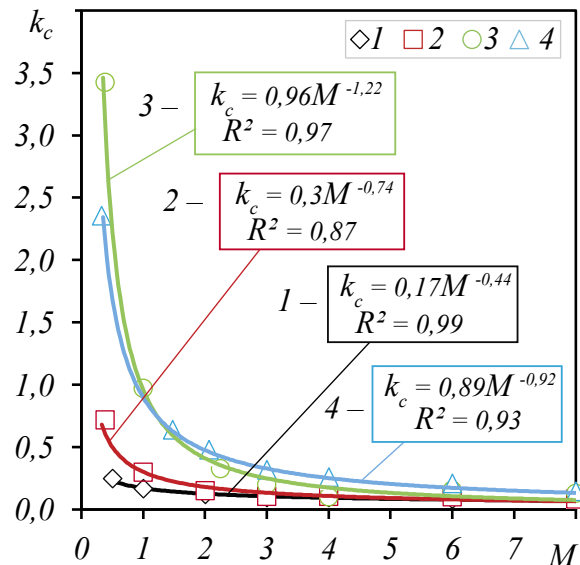
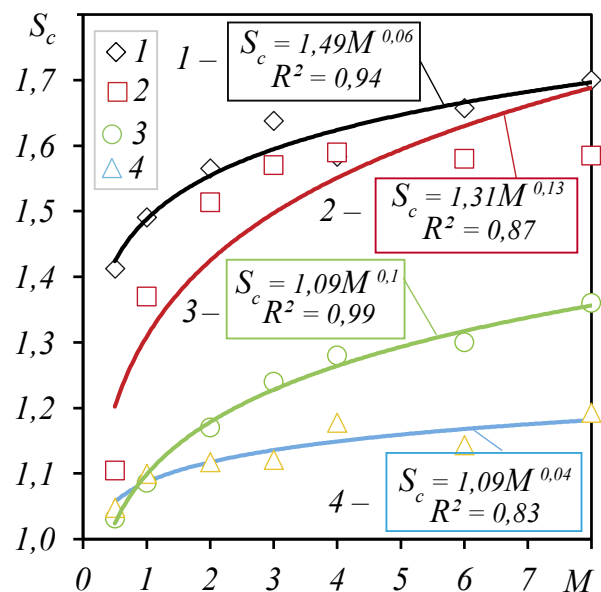


Рис. 5. Зависимость индекса резкости разделения S_c от масштаба M при различных скоростях входного газа W , м/с: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15

Fig. 5. Dependence of the sharpness index S_c on the scale factor M at different inlet gas velocities W , m/s: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15



зависимости $E(d)$, d_{50c} , k_c и S_c формируют инженерную основу для выбора типоразмера M и режима скорости W под требуемую крупность целевой фракции. При этом результаты работы показывают, что с точки зрения обеспечения высокой селективности разделения аппарат целесообразно рассматривать в области рабочих скоростей входного газа не ниже 10 м. с, поскольку именно в этих режимах формируется более выраженный S-образный переход и достигается более высокая резкость разделения.

В производственных условиях аппарат целесообразно рассматривать для линий кормопроизводства (подготовка премиксов, носителей и микрокомпонентов перед дозированием и смешением), для линий сухих пищевых ингредиентов (кондиционирование мукомольных, крахмалосодержащих и растительных белковых порошков, а также функциональных добавок), а также для процессов обращения с порошковыми и микрокапсулированными агрохимическими компонентами, где требуется ограничить унос и пылевую нагрузку на аспирацию. Важным практическим обстоятельством является то, что расчетные потери давления остаются умеренными (не более 550 Па при $W = 15$ м. с), что упрощает интеграцию аппарата в типовые контуры пневмотранспорта без существенного увеличения энергозатрат на перемещение воздуха.

Выводы/Conclusion

На основе проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Численное моделирование показало, что для частиц плотностью около 1000 кг/м³ в исследованной области размеров 1–100 мкм мультивихревой классификатор формирует устойчивые S-образные зависимости фракционной эффективности $E(d)$, что подтверждает работоспособность аппарата в условиях, релевантных сухому

фракционированию органических, пищевых и кормовых порошков.

2. При увеличении геометрического масштаба аппарата M диаметр граничного зерна d_{50c} систематически возрастает при всех значениях W , что соответствует смещению разделительного размера в область более крупных частиц. Для $W = 1–5$ м/с рост d_{50c} при переходе от $M = 0,5$ к $M = 8$ составляет около 2,3 раза, тогда как для $W = 10–15$ м/с составляет 4,3–4,5 раза.

3. Параметр кривизны k_c уменьшается с ростом масштаба M , что соответствует расширению переходной области кривых $E(d)$ и снижению селективности разделения.

4. Индекс резкости разделения S_c при увеличении масштаба M , как правило, возрастает, что подтверждает ухудшение селективности при переходе к более крупным типоразмерам. Наименее селективный режим соответствует $W = 1$ м. с, где S_c находится в диапазоне 1,41–1,70. При $W = 5$ м/с значения S_c составляют 1,10–1,59. Наиболее благоприятные по резкости режимы получены при $W = 10$ и 15 м. с, где S_c сохраняется ближе к 1 и составляет 1,03–1,36 и 1,05–1,19 соответственно.

5. В исследованном диапазоне режимов гидравлическое сопротивление мультивихревого классификатора остается умеренным, которое составляет не более 550 Па при скоростях газа W до 15 м. с.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках гранта Академии Наук Республики Татарстан на поддержку программ развития передовых инженерных школ республиканского значения «ТурбоПИШ», соглашение 1РПИШ от 19.12.2025 г.

FUNDING

The work was carried out within the framework of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to support programs for the development of advanced engineering schools of national significance «Turbo Advanced Engineering School», agreement 1 Russian advanced engineering school dated 12/19/2025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Suhag R., Kellil A., Razem M. Factors Influencing Food Powder Flowability. *Powders*. 2024; 3(1): 65–76. <https://doi.org/10.3390/powders3010006>
- Nunnenkamp D., Bierschenk E., Westendarp H., Wolf P. Particle Size Distribution of Organic Complete Diets for Laying Hens during Feed Offering. *Agriculture*. 2022; 12(2): 272. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020272>
- Lie-Piang A., Yang J., Schutyser M.A.I., Nikiforidis C.V., Boom R.M. Mild Fractionation for More Sustainable Food Ingredients. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2023; 14: 473–493. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721-024052>
- Holt D., Aldrich C.G. Evaluation of Mixing Efficacy of Carriers for Supplemental Nutrient Premixes in Animal Feed. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*. 2021; 7(10): 17. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.8155>
- Matuszek D.B., Bierzynski K., Jedrysiak A., Kraszewska A. Homogeneity of the selected food mixes. *Czech Journal of Food Sciences*. 2021; 39(3): 197–207. <https://doi.org/10.17221/225/2020-CJFS>
- Zhang F., O'Mahony J.A., Miao S., Cronin K. An Experimental Study on the Dilute Phase Pneumatic Conveying of Fat-Filled Milk Powders: Particle Breakage. *Powders*. 2023; 2(1): 124–134. <https://doi.org/10.3390/powders2010009>
- Shah D.S., Moravkar K.K., Jha D.K., Lonkar V., Amin P.D., Chalikwar S.S. A concise summary of powder processing methodologies for flow enhancement. *Heliyon*. 2023; 9(6): e16498. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16498>
- Hazlett R., Schmidmeier C., O'Mahony J.A. Approaches for improving the flowability of high-protein dairy powders post spray drying — A review. *Powder Technology*. 2021; 388: 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.03.021>
- Perelli S., D'Angelo D., Pellegrini L. Analysis of Dust Fires and Explosions in the Food Processing Industry. *Chemical Engineering Transactions*. 2023; 104: 169–174. <https://doi.org/10.3303/CET23104029>
- Jezsó K., Peciar P. Influence of the Selected Sieving Parameters on the Sieving Efficiency of Material MCC Avicel PH102. *Strojnický časopis — Journal of Mechanical Engineering*. 2022; 72(1): 77–88. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0008>

REFERENCES

- Suhag R., Kellil A., Razem M. Factors Influencing Food Powder Flowability. *Powders*. 2024; 3(1): 65–76. <https://doi.org/10.3390/powders3010006>
- Nunnenkamp D., Bierschenk E., Westendarp H., Wolf P. Particle Size Distribution of Organic Complete Diets for Laying Hens during Feed Offering. *Agriculture*. 2022; 12(2): 272. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020272>
- Lie-Piang A., Yang J., Schutyser M.A.I., Nikiforidis C.V., Boom R.M. Mild Fractionation for More Sustainable Food Ingredients. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2023; 14: 473–493. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721-024052>
- Holt D., Aldrich C.G. Evaluation of Mixing Efficacy of Carriers for Supplemental Nutrient Premixes in Animal Feed. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*. 2021; 7(10): 17. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.8155>
- Matuszek D.B., Bierzynski K., Jedrysiak A., Kraszewska A. Homogeneity of the selected food mixes. *Czech Journal of Food Sciences*. 2021; 39(3): 197–207. <https://doi.org/10.17221/225/2020-CJFS>
- Zhang F., O'Mahony J.A., Miao S., Cronin K. An Experimental Study on the Dilute Phase Pneumatic Conveying of Fat-Filled Milk Powders: Particle Breakage. *Powders*. 2023; 2(1): 124–134. <https://doi.org/10.3390/powders2010009>
- Shah D.S., Moravkar K.K., Jha D.K., Lonkar V., Amin P.D., Chalikwar S.S. A concise summary of powder processing methodologies for flow enhancement. *Heliyon*. 2023; 9(6): e16498. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16498>
- Hazlett R., Schmidmeier C., O'Mahony J.A. Approaches for improving the flowability of high-protein dairy powders post spray drying — A review. *Powder Technology*. 2021; 388: 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.03.021>
- Perelli S., D'Angelo D., Pellegrini L. Analysis of Dust Fires and Explosions in the Food Processing Industry. *Chemical Engineering Transactions*. 2023; 104: 169–174. <https://doi.org/10.3303/CET23104029>
- Jezsó K., Peciar P. Influence of the Selected Sieving Parameters on the Sieving Efficiency of Material MCC Avicel PH102. *Strojnický časopis — Journal of Mechanical Engineering*. 2022; 72(1): 77–88. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0008>

11. Pulivarthy M.K. *et al.* Dry fractionation process operations in the production of protein concentrates: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2023; 22(6): 4670–4697. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13237>
12. Meenakshi Sundaram G.S., Das D., Emiola-Sadiq T., Sajeeb Khan A., Zhang L., Meda V. Developments in the Dry Fractionation of Plant Components: A Review. *Separations*. 2024; 11(12): 332. <https://doi.org/10.3390/separations11120332>
13. Cammerata A., Sestili F., Laddomada B., Aureli G. Bran-Enriched Milled Durum Wheat Fractions Obtained Using Innovative Micronization and Air-Classification Pilot Plants. *Foods*. 2021; 10(8): 1796. <https://doi.org/10.3390/foods10081796>
14. Cammerata A., Marabottini R., Allevato E., Aureli G., Stazi S.R. Content of minerals and deoxynivalenol in the air-classified fractions of durum wheat. *Cereal Chemistry*. 2021; 98(5): 1101–1111. <https://doi.org/10.1002/cche.10458>
15. Wetterauw K., Wilms P., Boom R., van der Linden E., Venema P., Schutyser M. Air classification of starch-rich pulse flours: A generic method to predict starch-protein separation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2026; 108: 104407. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104407>
16. Guo M. *et al.* An overview of novel geometrical modifications and optimizations of gas-particle cyclone separators. *Separation and Purification Technology*. 2024; 329: 125136. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125136>
17. Kaas A., Mütze T., Peuker U.A. Review on Zigzag Air Classifier. *Processes*. 2022; 10(4): 764. <https://doi.org/10.3390/pr10040764>
18. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmich A., Kalinichenko R., Hryshchenko V. Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal of Central European Agriculture*. 2023; 24(1): 225–235. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>
19. Исмаилова Х.Р. Моделирование процесса пневмосепарации семян подсолнечника в воздушном потоке. *Аграрная наука*. 2018; (11–12): 87–90. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2018-320-11-87-90>
20. Sun Z., Liang L., Liu C., Zhu Y., Zhang L., Yang G. CFD simulation and performance optimization of a new horizontal turbo air classifier. *Advanced Powder Technology*. 2021; 32(4): 977–986. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.041>
21. Yu Y., Li X., Zhang Y., Jiao Z., Liu J. The influence of air inlet layout on the inner flow field for a vertical turbo air classifier. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2023; 59(6): 175859. <https://doi.org/10.37190/ppmp/175859>
22. Mou X., Jia F., Fang Y., Chen C. CFD-Based Structural Optimization of Rotor Cage for High-Efficiency Rotor Classifier. *Processes*. 2021; 9(7): 1148. <https://doi.org/10.3390/pr9071148>
23. Jia F., Mou X., Fang Y., Chen C. A New Rotor-Type Dynamic Classifier: Structural Optimization and Industrial Applications. *Processes*. 2021; 9(6): 1033. <https://doi.org/10.3390/pr9061033>
24. Eckhoff R.K., Li G. Industrial Dust Explosions. A Brief Review. *Applied Sciences*. 2021; 11(4): 1669. <https://doi.org/10.3390/app11041669>
25. Sulaiman S.Z., Mohd Mokhtar K., Wan Sulaiman W.Z., Semawi N.H. Flame propagation and explosion characteristics of food-based dust as a function of dust concentration. *Process Safety Progress*. 2024; 43(3): 579–586. <https://doi.org/10.1002/prs.12591>
26. Pahasup-anan T. *et al.* Dust Explosion Risk Assessment of Extruded Food Production Process by Fault Tree Analysis. *ACS Chemical Health & Safety*. 2022; 29(1): 91–97. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.1c00036>
27. Прец М.А., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Мугинов А.М. Численное исследование влияния геометрических параметров мультивихревого классификатора на эффективность фракционирования частиц. *Вестник Технологического университета*. 2025; 28(4): 63–68. https://doi.org/10.55421/3034-4689_2025_28_4_63
28. Зинуров В.Э., Биккулов Р.Я., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Абдуллина А.А. экспериментальное определение гидравлического сопротивления мультивихревого сепаратора. *Ползуновский вестник*. 2023; (1): 191–199. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.024>
29. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994; 32(8): 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
30. Gosman A.D., Ioannides E. Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fueled Combustors. *Journal of Energy*. 1983; 7(6): 482–490. <https://doi.org/10.2514/3.62687>
11. Pulivarthy M.K. *et al.* Dry fractionation process operations in the production of protein concentrates: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2023; 22(6): 4670–4697. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13237>
12. Meenakshi Sundaram G.S., Das D., Emiola-Sadiq T., Sajeeb Khan A., Zhang L., Meda V. Developments in the Dry Fractionation of Plant Components: A Review. *Separations*. 2024; 11(12): 332. <https://doi.org/10.3390/separations11120332>
13. Cammerata A., Sestili F., Laddomada B., Aureli G. Bran-Enriched Milled Durum Wheat Fractions Obtained Using Innovative Micronization and Air-Classification Pilot Plants. *Foods*. 2021; 10(8): 1796. <https://doi.org/10.3390/foods10081796>
14. Cammerata A., Marabottini R., Allevato E., Aureli G., Stazi S.R. Content of minerals and deoxynivalenol in the air-classified fractions of durum wheat. *Cereal Chemistry*. 2021; 98(5): 1101–1111. <https://doi.org/10.1002/cche.10458>
15. Wetterauw K., Wilms P., Boom R., van der Linden E., Venema P., Schutyser M. Air classification of starch-rich pulse flours: A generic method to predict starch-protein separation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2026; 108: 104407. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104407>
16. Guo M. *et al.* An overview of novel geometrical modifications and optimizations of gas-particle cyclone separators. *Separation and Purification Technology*. 2024; 329: 125136. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125136>
17. Kaas A., Mütze T., Peuker U.A. Review on Zigzag Air Classifier. *Processes*. 2022; 10(4): 764. <https://doi.org/10.3390/pr10040764>
18. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmich A., Kalinichenko R., Hryshchenko V. Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal of Central European Agriculture*. 2023; 24(1): 225–235. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>
19. Ismailova H.R. Modeling of air separation of sunflower seeds in the air stream. *Agrarian science*. 2018; (11–12): 87–90 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2018-320-11-87-90>
20. Sun Z., Liang L., Liu C., Zhu Y., Zhang L., Yang G. CFD simulation and performance optimization of a new horizontal turbo air classifier. *Advanced Powder Technology*. 2021; 32(4): 977–986. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.041>
21. Yu Y., Li X., Zhang Y., Jiao Z., Liu J. The influence of air inlet layout on the inner flow field for a vertical turbo air classifier. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2023; 59(6): 175859. <https://doi.org/10.37190/ppmp/175859>
22. Mou X., Jia F., Fang Y., Chen C. CFD-Based Structural Optimization of Rotor Cage for High-Efficiency Rotor Classifier. *Processes*. 2021; 9(7): 1148. <https://doi.org/10.3390/pr9071148>
23. Jia F., Mou X., Fang Y., Chen C. A New Rotor-Type Dynamic Classifier: Structural Optimization and Industrial Applications. *Processes*. 2021; 9(6): 1033. <https://doi.org/10.3390/pr9061033>
24. Eckhoff R.K., Li G. Industrial Dust Explosions. A Brief Review. *Applied Sciences*. 2021; 11(4): 1669. <https://doi.org/10.3390/app11041669>
25. Sulaiman S.Z., Mohd Mokhtar K., Wan Sulaiman W.Z., Semawi N.H. Flame propagation and explosion characteristics of food-based dust as a function of dust concentration. *Process Safety Progress*. 2024; 43(3): 579–586. <https://doi.org/10.1002/prs.12591>
26. Pahasup-anan T. *et al.* Dust Explosion Risk Assessment of Extruded Food Production Process by Fault Tree Analysis. *ACS Chemical Health & Safety*. 2022; 29(1): 91–97. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.1c00036>
27. Prets M.A., Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Muginov A.M. Numerical Study of the Influence of Geometric Parameters of a Multi-Vortex Classifier on Particle Fractionation Efficiency. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2025; 59(4): 1033–1038. <https://doi.org/10.1134/S0040579524601420>
28. Zinurov V.E., Bikkulov R.Ya., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N., Abdullina A.A. Experimental Determination of Hydraulic Resistance of a Multi-Vortex Separator. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024; 58(3): 832–837. <https://doi.org/10.1134/S0040579524601420>
29. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994; 32(8): 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
30. Gosman A.D., Ioannides E. Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fueled Combustors. *Journal of Energy*. 1983; 7(6): 482–490. <https://doi.org/10.2514/3.62687>

ОБ АВТОРАХ

Мария Арнольдовна Прец

аспирант

precmari@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-4434-3906>**Вадим Эдуардович Зинуров**

кандидат технических наук,

заведующий кафедрой

vadd_93@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

Казанский государственный энергетический университет,
ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Mariia Arnoldovna Prets

Postgraduate student

precmari@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-4434-3906>**Vadim Eduardovich Zinurov**

Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering),

Head of the Department

vadd_93@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya st., Kazan, 420066, Russia