

М. А. Прец, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев,
В. А. Вдовина

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ И ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ
НА ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ЧАСТИЦ В МУЛЬТИВИХРЕВОМ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕ -
КЛАССИФИКАТОРЕ ВОЗДУШНОГО ТИПА**

Ключевые слова: мультивихревой классификатор, пылеуловитель-классификатор, воздушный классификатор, фракционирование частиц, сепарация частиц из газа, диаметр граничного зерна, вихревое разделение, классификация мелкодисперсных частиц.

В условиях возрастающих требований к экологической безопасности и качеству продуктов нефтехимической переработки особую актуальность приобретают технологии эффективного отделения мелкодисперсных твёрдых частиц из газовых потоков. В связи с этим возрастающий интерес вызывают компактные высокоеффективные устройства для фракционирования твёрдых мелкодисперсных частиц. В работе предложена конструкция мультивихревого пылеуловителя-классификатора с направляющими дугообразными элементами, позволяющая минимизировать унос мелкодисперсных частиц из аппарата за счёт снижения вероятности многократного отражения частиц от стенок в сторону соседних вихрей в кольцевом пространстве. Целью работы является оценка относительного вклада гравитационных и центробежных сил в процесс разделения частиц в мультивихревом воздушном пылеуловителе-классификаторе. Разработана аналитическая модель, описывающая движение частицы в трёхмерном вращающемся потоке, позволяющая оценить диаметр граничного зерна фракционирования в зависимости от геометрических и режимных параметров. Получено выражение для расчета безразмерного параметра S , позволяющего оценить соотношение между центробежной и гравитационной составляющими силового воздействия на частицы в вихревом потоке. Проведён численный анализ изменения параметра S при варьировании скорости истечения газа из щелей, высоты вихря и его диаметра. Получено, что при $S \rightarrow 0$ наблюдается доминирование центробежных эффектов, тогда как при $S \rightarrow 1$ существенное влияние начинает оказывать гравитационная составляющая. При скоростях истечения газа из щелей более 3,1 м/с и $h_1 = 1$ мм значение параметра S становится менее 10 %, что указывает на доминирование центробежного механизма над гравитационным при сепарации частиц из газопылевого потока. Увеличение характерной высоты вихря h_1 и уменьшение его диаметра d_s приводят к снижению параметра S , усиливая центробежные эффекты и повышая эффективность разделения.

**M. A. Prets, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev,
V. A. Vdovina**

**ANALYTICAL MODEL FOR ESTIMATING THE EFFECT OF GRAVITATIONAL
AND CENTRIFUGAL FORCES ON PARTICLE FRACTIONATION
IN AN AIR-TYPE MULTI-VORTEX DUST COLLECTOR CLASSIFIER**

Keywords: multi-vortex classifier, dust collector classifier, air classifier, particle fractionation, separation of particles from gas, boundary grain diameter, vortex separation, classification of fine particles.

In the context of increasing demands on environmental safety and the quality of petrochemical processing products, technologies for the effective separation of fine particulate matter from gas streams are becoming particularly relevant. In this regard, compact, highly efficient devices for fractionation of fine solid particles are of increasing interest. The paper proposes a design of a multi-vortex dust collector classifier with guiding arc-shaped elements, which minimizes the entrainment of fine particles from the apparatus by reducing the probability of repeated reflection of particles from the walls towards neighboring vortices in the annular space. The aim of the work is to evaluate the relative contribution of gravitational and centrifugal forces to the particle separation process in a multi-vortex air dust collector classifier. An analytical model has been developed describing the motion of a particle in a three-dimensional rotating flow, which makes it possible to estimate the diameter of the boundary grain of fractionation depending on geometric and operating parameters. An expression is obtained for calculating the dimensionless parameter S , which makes it possible to estimate the ratio between the centrifugal and gravitational components of the force action on particles in a vortex flow. A numerical analysis of the change in the parameter S is carried out with varying gas flow rate from the cracks, the height of the vortex and its diameter. It is found that at $S \rightarrow 0$, centrifugal effects dominate, whereas at $S \rightarrow 1$, the gravitational component begins to exert a significant influence. At gas flow rates from the cracks of more than 3.1 m/s and $h_1 = 1$ mm, the value of the parameter S becomes less than 10%, which indicates the dominance of the centrifugal mechanism over the gravitational one during the separation of particles from the gas-dust stream. An increase in the characteristic height of the vortex h_1 and a decrease in its diameter d_s lead to a decrease in the parameter S , enhancing centrifugal effects and increasing separation efficiency.

Точные методы фракционирования мелкодисперсных порошков приобретают всё большее значение в химической и нефтехимической промышленности, особенно при производстве

материалов с заданным гранулометрическим составом. Например, мелкодисперсный силикагель с диаметром частиц от 0,01 до 0,1 мм широко используется при осушке и очистке технологических

газов, также он применяется в качестве носителя катализаторов при переработке углеводородного сырья [1, 2]. Фракции оксида алюминия находят применение в процессах крекинга и гидроочистки в качестве активных катализаторов либо их носителей. Карбонаты и сульфаты металлов используются как осадители примесей в буровых растворах и в качестве функциональных наполнителей при производстве полимерных композиций [3]. Кроме того, всё более широкое распространение получают углеродные нанопорошки, применяемые в электрохимических источниках тока, а также при модификации свойств резиновых и пластиковых материалов [4].

В условиях интенсивного развития направлений, связанных с производством катализаторов, сорбентов, порошковых лакокрасочных материалов, порошков карбоната кальция и диоксида титана, особую актуальность приобретает задача формирования узкого фракционного состава. Это позволяет повысить однородность физико-химических свойств готового продукта, обеспечить стабильность параметров технологических процессов (в частности, в катализе и сорбции), улучшить равномерность распределения частиц в объёме материала – при порошковом окрашивании, спекании или напылении. Напротив, широкий гранулометрический состав приводит к ухудшению технологических характеристик, снижению выхода целевой фракции и повышению энергоёмкости последующих стадий обработки. В этой связи достижение высокой селективности при разделении частиц по размерам становится ключевым фактором повышения эффективности и качества продукции.

Согласно прогнозам [5-8], в ближайшие 10 лет наблюдается устойчивая тенденция роста мирового потребления мелкодисперсных порошков. Лидирующие позиции сохраняет карбонат кальция, объём рынка которого вырастет с 55 до 90 млрд. \$ (рис. 1). Существенный рост также демонстрируют сегменты катализаторов, порошковой окраски и титанового порошка, что свидетельствует о расширении сферы применения высокодисперсных материалов в химико-технологических процессах.

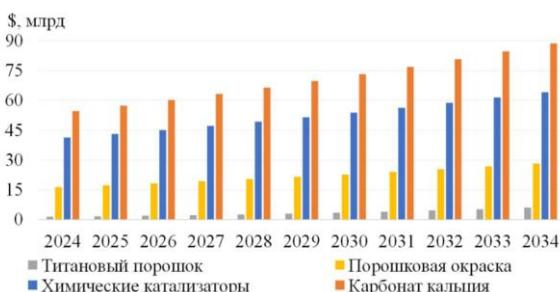


Рис. 1 – Мировой рынок мелкодисперсных порошков

Fig. 1 – Global Fine Powder market

В настоящее время фракционирование мелкодисперсных порошков осуществляется с применением мокрых и сухих методов, выбор которых определяется физико-химическими

свойствами частиц и требованиями к точности разделения. Мокрые методы основаны на разделении твёрдых частиц в жидкой среде. Седиментация проста и не требует сложного оборудования, однако процесс осаждения медленный и чувствителен к внешним условиям, что ограничивает применение [9, 10]. Гидроциклоны позволяют повысить скорость разделения за счёт центробежной силы, но не обеспечивают высокой точности для мелких частиц [11-13]. Мембранные и фильтрационные технологии обеспечивают хорошую степень разделения, но быстро засоряются и требуют регулярной очистки [14]. Флотационные методы эффективны при наличии различий в поверхностных свойствах частиц, но зависят от точного подбора реагентов и условий вспенивания [15]. Наиболее распространенным методом воздушной классификации является механическое просеивание. Оно эффективно для крупных частиц, но не позволяет достичь высокой эффективности при размерах менее 50 мкм и вызывает износ сит [16-19]. Гравитационные методы не позволяют достичь высокой эффективности фракционирования и требуют больших энергозатрат. Инерционные и центробежные устройства, включая циклоны, надёжны и подходят для частиц от 20-30 мкм, но не обеспечивают высокой точности [20, 21]. Роторные классификаторы обладают лучшей селективностью, однако сложны и затратны в эксплуатации. Методы фильтрации и электрофизического улавливания применимы в основном для финальной очистки [22-24].

Таким образом, ни одна из групп классификаторов не даёт одновременно высокой точности, простоты конструкции и низкой стоимости. Это создаёт необходимость поиска компромиссного решения, которое позволило бы объединить преимущества обеих концепций – обеспечить высокую эффективность фракционирования при отсутствии подвижных деталей, сохранить низкий уровень энергопотребления и возможность оперативной настройки под конкретную технологическую задачу.

Современные научные исследования по воздушной классификации порошков отражают устойчивый интерес к повышению эффективности разделения и снижению энергозатрат. Исследования охватывают оптимизацию конструкции классификаторов, моделирование процессов сепарации и адаптацию оборудования под специализированные задачи.

Работы [22-24] посвящены изучению режимов работы и конструктивных характеристик центробежных классификаторов с использованием численного моделирования газодинамики для улучшения геометрии и рабочих параметров. В работах [25-27] предлагается повышение эффективности классификации за счёт анализа геометрических признаков и оптимизации конструкции, включая применение машинного обучения и эволюционной оптимизации. Исследования [28-30] рассматривают факторы, влияющие на рентабельность применения классификаторов, включая энергозатраты,

селективность разделения и эксплуатационные издержки. Отмечается важность комплексной оценки, сочетающей техническую и экономическую эффективность при модернизации оборудования. Несмотря на развитую теоретическую базу, сохраняется потребность в инженерных решениях, сочетающих простоту, эффективность и масштабируемость, особенно для узкоцелевых задач, таких как селективное выделение фракции 10-40 мкм при производстве катализаторных носителей и адсорбентов.

Авторами предлагается мультивихревой пылеуловитель-классификатор (рис. 2), представляющий собой аппарат воздушного типа, в котором реализуется селективное отделение твёрдых частиц из газа под действием центробежных и аэродинамических сил в условиях формируемого восходящего вихревого потока. Ключевой конструктивной особенностью устройства является организация множественных квазистационарных вихревых структур в кольцевом зазоре между двумя коаксиально расположенными цилиндрическими трубами: внутренней направляющей трубой 2 и наружным корпусом 1. Подача газопылевой смеси осуществляется через вертикальный входной патрубок 2, размещённый в верхней части аппарата. Внутри аппарата поток разделяется на две составляющие части. Первая составляющая направляется через систему прямоугольных прорезей 7, выполненных в стенке внутренней трубы под углом к горизонтали α . Истечение газа через эти щели приводит к формированию направленных тангенциальных струй, инициирующих образование устойчивых вихревых структур в кольцевом зазоре. В отличие от ранее предложенной конструкции [31], в рассматриваемом пылеуловителе-классификаторе в кольцевое пространство дополнительно установлены направляющие дугообразные элементы 8, способствующие повышению структурированной организации вихрей и снижению вероятности перемещения частиц между соседними зонами вращения за счёт отражения от стенок. Характерный диаметр формируемых вихрей d_s зависит от геометрии кольцевого пространства. Вторая составляющая потока перемещается по центральному каналу вниз и затем разворачивается на 180°, образуя восходящий поток, направленный вдоль вертикальной оси пылеуловителя-классификатора [32]. Такое направление потока реализовано конструктивно с учётом наличия в коническом днище 6 специального отверстия, через которое обеспечивается ссыпание тяжёлых и крупнодисперсных частиц в бункер для сбора пыли 4. Это позволяет предотвратить накопление крупнодисперсных частиц во внутренней трубе и, как следствие, исключить её забивание в процессе эксплуатации [33].

Принцип функционирования пылеуловителя-классификатора основан на инерционном разделении частиц различной дисперсности в трёхмерном потоке [34]. В результате действия подъемных сил восходящего потока и центробежных сил, возникающих во вращающихся зонах, реализуется

сепарация дисперсной фазы из газопылевого потока. Частицы, обладающие малой массой и малыми размерами, при попадании в центральную часть вихря увлекаются восходящим потоком и выносятся через верхнее выпускное отверстие. Более крупные и инерционные фракции под действием центробежного ускорения перемещаются к периферии вихрей, где теряют кинетическую энергию и осаждаются в бункере пылеуловителя-классификатора.

Таким образом, механизм разделения реализуется за счёт пространственного перераспределения частиц по инерционным признакам в области действия вихревого поля. Центробежное ускорение, пропорциональное квадрату тангенциальной скорости, обеспечивает отклонение тяжёлых частиц от центральной оси, в то время как осевая компонента движения влияет на их транспортировку по высоте пылеуловителя-классификатора.

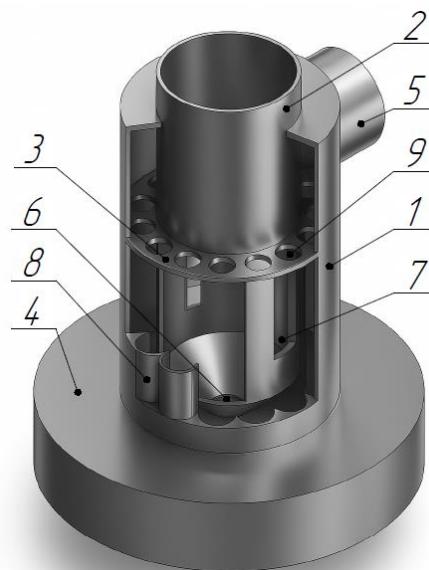


Рис. 2 – Мультивихревой воздушный пылеуловитель-классификатор: 1 – корпус; 2 – труба входа газопылевого потока; 3 – экран, состоящий из поперечной перегородки; 4 – бункер для сбора пыли; 5 – патрубок вывода очищенного газа; 6 – днище коническое; 7 – прорези прямоугольной формы; 8 – направляющие дугообразные элементы; 9 – отверстия радиальные

Fig. 2 – Multi-vortex air dust collector classifier: 1 – housing; 2 – inlet pipe of the gas and dust stream; 3 – screen consisting of a transverse partition; 4 – dust collection hopper; 5 – outlet pipe for purified gas; 6 – conical bottom; 7 – rectangular slots; 8 – guiding arc-shaped elements; 9 – radial holes

Особую научную и прикладную значимость приобретает задача прогнозирования диаметра граничного зерна разделения. Учитывая, что в предлагаемом пылеуловителе-классификаторе процесс разделения осуществляется преимущественно за счёт соотношения между центробежными и гравитационными силами, важной задачей является установление количественной

взаимосвязи между ними, определяющими конечный результат сепарации.

Целью работы является оценка относительного вклада гравитационных и центробежных сил в процесс разделения частиц в мультивихревом воздушном пылеуловителе-классификаторе на основе разработки аналитической модели.

В ходе ее разработки был рассмотрен один из формирующихся в кольцевом пространстве устойчивых вихрей высотой h_1 , локализованный между прорезью прямоугольной формы и экраном 3 (рис. 2). Такой подход позволяет сосредоточиться на анализе типичного элемента структуры потока, играющего ключевую роль в процессе фракционирования частиц. В рамках инженерного упрощения данный вихрь моделировался как изолированный объём вращающегося газа, ограниченный по радиусу цилиндрической стенкой, сверху плоской крышкой с центральным выходным отверстием диаметром d_0 , снизу областью входа восходящего потока.

Поступление воздуха снизу вызывает формирование восходящего движения. В рамках упрощения распределение осевой компоненты скорости в пределах рассматриваемого объёма принято линейным по радиусу r :

$$W_z(r) = a_z r + W_z, \quad (1)$$

где a_z – коэффициент изменения осевой скорости по радиусу, $1/c$; W_z – скорость потока на оси вихря (при $r = 0$), m/s .

В связи с тангенциальной подачей газа через прорези внутренней трубы, в аналитической модели было принято допущение, что тангенциальная скорость газа в пределах одного вихря приближённо соответствует величине $W_\phi = W_{sl}$ – скорости истечения струи из щели. Эта скорость принимается равной тангенциальной скорости потока на радиусе $r = d_s/2$, что обосновано геометрией формирования струи и симметрией зоны вращения. Тогда распределение тангенциальной компоненты скорости может быть представлено следующим выражением:

$$W_\phi(r) = \frac{2r}{d_s} W_{sl}, \quad (2)$$

где W_{sl} – скорость истечения газа из прямоугольной щели, m/s .

Для описания вертикального перемещения отдельной твердой частицы в вихревом потоке рассматривается её движение под действием восходящего газового потока, силы тяжести и аэродинамического сопротивления. Учитывая выражение (1) и ограниченную турбулентность, вертикальная скорость перемещения частицы вдоль оси может быть выражена на основе второго закона Ньютона:

$$m_p \frac{dW_{pz}(r)}{dt} = F_z(r) - m_p g, \quad (3)$$

где m_p – масса частицы, kg ; $W_{pz}(r)$ – осевая скорость подъёма частицы, m/s ; F_z – аэродинамическая сила сопротивления, N ; g – ускорение свободного падения, m/s^2 .

Масса частицы рассчитывается по классическому выражению (4):

$$m_p = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p, \quad (4)$$

где d_p – диаметр частицы, m ; ρ_p – плотность материала частицы, kg/m^3 .

В рамках допущений разработки аналитической модели при описании аэродинамического сопротивления было принято приближение закона Стокса, применимого для малых частиц при малых числах Рейнольдса:

$$F_z = 3\pi\mu d_p (W_{gz}(r) - W_{pz}(r)), \quad (5)$$

где μ – динамическая вязкость газа, $Pa\cdot s$; $W_{gz}(r)$ – осевая скорость газового потока на расстоянии r от оси, m/s .

Исходя из уравнения (3), проанализируем стационарный режим движения частицы в вертикальном направлении, при котором её скорость достигает постоянного значения. В этом случае левая часть уравнения обращается в ноль, что соответствует установившемуся движению без ускорения. Подставляя выражение для силы аэродинамического сопротивления (5) в уравнение (3), получим:

$$3\pi\mu d_p (W_{gz}(r) - W_{pz}(r)) - m_p g = 0. \quad (6)$$

На основании выражения (6) можно определить осевую скорость подъёма частицы $W_{pz}(r)$:

$$W_{pz}(r) = W_{gz}(r) - \frac{m_p g}{3\pi\mu d_p}. \quad (7)$$

Подставляя значение радиуса $r = 0$ в выражение (1), получим осевую скорость газа в центре вихря $W_z(0) = W_z$. Тогда, с учётом уравнения (4) для массы частицы и подстановки в формулу (7), осевая скорость частицы на оси вихря определяется следующим образом:

$$W_{pz}(0) = W_z - \frac{\rho_p d_p^2 g}{18\mu}. \quad (8)$$

Примем, что осевая скорость газа W_z слабо изменяется по радиусу и в пределах вихревой зоны может быть аппроксимирована как постоянная величина. В этом приближении время перемещения частицы по высоте вихря h_1 определяется как:

$$\tau = \frac{h_1}{W_{pz}}. \quad (9)$$

Следует отметить, что под величиной h_1 подразумевается область, в пределах которой формируется устойчивый полноценный вихрь, характеризующийся доминирующим влиянием центробежных сил на динамику частиц. Таким образом, в рамках дальнейшего анализа параметр h_1 рассматривается в качестве характерной высоты вихря.

Подставляя выражение (8) в формулу (9), получим:

$$\tau = \frac{h_1}{W_z - \frac{\rho_p d_p^2 g}{18\mu}}. \quad (10)$$

В радиальном направлении на частицу действуют две силы: центробежная, обусловленная вращательным движением, и аэродинамическое сопротивление:

$$m_p \frac{W_{\rho\phi}^2(r)}{r} = 3\pi\mu d_p (W_\phi(r) - W_{\rho\phi}(r)), \quad (11)$$

где $W_{\rho\phi}(r)$ – тангенциальная скорость частицы, м/с; $W_\phi(r)$ – тангенциальная скорость газового потока, м/с.

Поскольку рассматриваются частицы сравнительно малых размеров и турбулентность потока умеренна, инерционные силы можно считать незначительными по сравнению с сопротивлением среды. Это позволяет использовать приближение квазистационарного движения, при котором частица практически мгновенно адаптируется к скорости окружающего газа: $W_{\rho\phi}(r) \approx W_\phi(r)$. Тогда центробежная сила может быть рассчитана по выражению:

$$F_c = m_p \frac{W_\phi^2(r)}{r}. \quad (12)$$

Подставив в уравнение (12) выражение (2) для расчета $W_\phi(r)$, получим выражение для расчета центробежной силы в зависимости от радиуса r :

$$F_c(r) = m_p \frac{4r}{d_s^2} W_{sl}^2. \quad (13)$$

Сопротивление радиальному перемещению частицы в условиях малых размеров и низких скоростей учитывается по аналогии с законом Стокса. При этом предполагается, что радиальное движение вызывается исключительно действием центробежной силы. Соответствующее выражение имеет вид:

$$F_c(r) = 3\pi\mu d_p W_{pr}. \quad (14)$$

Подставляя в выражение (14) формулу (13) для расчета $F_c(r)$ и выражение (4) для массы частицы m_p , получим итоговую формулу для расчёта радиальной скорости частицы:

$$W_{pr}(r) = \frac{2\rho_p d_p^2 r W_{sl}^2}{9\mu d_s^2}. \quad (15)$$

Критерием эффективной сепарации частицы из вертикального вихря является условие, при котором она за время τ успевает радиально переместиться от начального положения с радиусом r_0 до радиуса $d_0/2$. Это условие может быть записано в форме определённого интеграла:

$$\frac{d_0}{2} - r_{p0} = \int_0^{r_{p0}} W_{pr}(r) dt, \quad (16)$$

где r_{p0} – начальное радиальное положение частицы, м.

Для упрощения анализа в уравнении (16) примем приближение средней радиальной скорости между начальными и конечными координатами частицы. Тогда выражение приобретает вид:

$$\bar{W}_{pr} = \frac{W_{pr}(r_{p0}) + W_{pr}\left(\frac{d_0}{2}\right)}{2}. \quad (17)$$

С учётом уравнения (15), описывающего зависимость радиальной скорости от радиуса,

подставим его в выражение (17) и получим формулу для средней радиальной скорости:

$$\bar{W}_{pr} = \frac{\rho_p d_p^2 W_{sl}^2 \left(r_{p0} + \frac{d_0}{2} \right)}{9\mu d_s^2}. \quad (18)$$

Преобразуем критерий эффективной сепарации (16) с учётом выражений (9) и (18), подставляя полученные зависимости:

$$\frac{d_0}{2} - r_{p0} = \frac{\rho_p d_p^2 W_{sl}^2 h_l \left(r_{p0} + \frac{d_0}{2} \right)}{9\mu d_s^2 \left(W_z - \frac{\rho_p d_p^2 g}{18\mu} \right)}. \quad (19)$$

Выразим из выражения (19) диаметр частицы d_p , интерпретируемый как диаметр граничного зерна фракционирования:

$$d_p = \sqrt{\frac{9\mu d_s^2 \left(\frac{d_0}{2} - r_{p0} \right) W_z}{\rho_p \left[W_{sl}^2 h_l \left(r_{p0} + \frac{d_0}{2} \right) + 0,5 d_s^2 g \left(\frac{d_0}{2} - r_{p0} \right) \right]}}. \quad (20)$$

Для упрощения аналитического выражения (20) предполагается, что начальное положение частицы соответствует центральной оси вихря, т. е. $r_{p0} = 0$. Такое допущение соответствует наименее благоприятному сценарию для разделения, при котором частица стартует из области с минимальным действием центробежных сил. Если при этом условии выполняется критерий выхода частицы за пределы границы сепарации, можно считать, что она будет гарантированно отсепарирована и при любых других, более благоприятных начальных положениях. Тогда получим выражение (21):

$$d_p = \sqrt{\frac{9\mu d_s^2 W_z \frac{d_0}{2}}{\rho_p \left[W_{sl}^2 h_l \frac{d_0}{2} + 0,5 d_s^2 g \frac{d_0}{2} \right]}}. \quad (21)$$

Преобразовав и упростив выражение (21), получим следующий его вид (22):

$$d_p = 3 \sqrt{\frac{\mu W_z}{\rho_p \left[\left(W_{sl}/d_s \right)^2 h_l + 0,5g \right]}}. \quad (22)$$

Следует отметить, что выражение (22) по своей сути представляет собой предельное условие, при котором частица достигает границы области вращения, трактуемое как критерий эффективного отделения. Однако на практике это соответствует лишь касанию стенки пылеуловителя-классификатора, тогда как реальный процесс разделения частиц значительно сложнее и может сопровождаться многократными отражениями от стенок, повторным вовлечением в поток вследствие турбулентных флуктуаций и других неучтённых факторов.

Перечисленные эффекты не включаются в аналитическое выражение (22), что ограничивает его универсальность при описании реальных условий сепарации. В связи с этим для практического применения модели необходимо введение

эмпирически определяемого поправочного коэффициента X , отражающего долю эффективно отделяемых частиц с учётом совокупности перечисленных влияний. С учётом этого, аналитическая модель может быть представлена в следующем виде:

$$d_p = X \sqrt{\frac{\mu W_z}{\rho_p [(W_{sl}/d_s)^2 h_1 + 0,5g]}}, \quad (23)$$

где X – поправочный коэффициент, определяемый на основе обработки результатов численного моделирования или экспериментальных исследований.

Для количественной оценки относительного влияния гравитационного и центробежного механизмов на процесс сепарации частиц введен безразмерный параметр S , отражающий соотношение между двумя ключевыми составляющими, определяющими эффективность фракционирования (24). Данный параметр был получен на основе выражения (23):

$$S = \frac{g/2}{(W_{sl}/d_s)^2 h_1 + 0,5g}. \quad (24)$$

Представленный параметр S позволяет оценить вклад гравитационной составляющей $g/2$ относительно полной величины, определяющей процесс разделения.

Для получения количественной оценки безразмерного параметра S были проведены расчёты при фиксированных и варьируемых параметрах геометрии и режима течения. В ходе численного анализа постоянными принимались следующие значения: диаметр вихря d_s – 15 мм и характерная высота вихря h_1 – 10 мм. При этом варьировались следующие величины: скорость истечения газа из прорези W_{sl} от 1 до 7 м/с, параметры d_s от 10 до 20 мм и h_1 от 10 до 20 мм.

Результаты анализа представленных выше выражений показали, что согласно заключительному аналитическому соотношению (23), по которому рассчитывается диаметр граничного зерна фракционирования, можно выделить ряд ключевых факторов, оказывающих влияние на эффективность разделения частиц в мультивихревом пылеуловителе-классификаторе. Увеличение скорости истечения газа через щели W_{sl} ведёт к интенсификации тангенциальной компоненты вихря, что способствует росту центробежного ускорения и повышает вероятность отклонения частиц от оси. Увеличение высоты вихря h_1 увеличивает время пребывания частиц в области действия вихревого поля, создавая более эффективные условия для их сепарации. Снижение осевой скорости W_z ослабляет вертикальное выносящее воздействие, что позволяет эффективнее сепарировать из запыленного газа мелкие частицы. Уменьшение диаметра вихря d_s усиливает градиент тангенциальной скорости. Увеличение плотности частиц ρ_p способствует росту инерционности и ускоренному отклонению частиц к периферии.

Численные расчёты, выполненные с использованием аналитического выражения (24),

отражающего относительный вклад гравитационного механизма в суммарное силовое воздействие, включающее как гравитационные, так и центробежные силы в мультивихревой зоне пылеуловителя-классификатора, показали, что при $S \rightarrow 0$ наблюдается доминирование центробежных эффектов, тогда как при $S \rightarrow 1$ существенное влияние начинает оказывать гравитационная составляющая.

Безразмерный параметр S чувствителен ко всем варьируемым параметрам: скорости истечения газа из прямоугольной прорези W_{sl} , характерной высоты вихря h_1 и его диаметра d_s . При увеличении скорости истечения W_{sl} наблюдается резкое снижение величины S , что обусловлено усилением тангенциальной компоненты потока и, как следствие, ростом центробежного ускорения. При относительно высоких скоростях газа $W_{sl} \geq 3,1$ м/с (рис. 3 и рис. 4) значение параметра S становится пренебрежимо малым (менее 10 %), что указывает на практически полное доминирование центробежного механизма в условиях интенсивной циркуляции. Кроме того, изменение геометрических характеристик вихря также оказывает значительное влияние на распределение вкладов действующих сил. Увеличение характерной высоты вихря h_1 ведет к снижению значения S поскольку частицы дольше удерживаются в зоне действия вихревого поля, что способствует накоплению центробежного воздействия и увеличению вероятности отклонения к периферии. В противоположность этому, уменьшение высоты вихря при фиксированных остальных параметрах ограничивает время действия центробежных сил, тем самым повышая относительную роль гравитационного воздействия. Аналогично, варьирование диаметра вихря d_s демонстрирует, что при уменьшении этого параметра сила центробежного воздействия возрастает, что приводит к снижению значения S . Это связано с усилением градиента тангенциальной скорости при более компактной структуре вихря.

При увеличении скорости истечения газа из прямоугольной прорези W_{sl} в диапазоне 1-7 м/с безразмерный параметр S изменяется от 0,52 до 0,022, от 0,18 до 0,004 и от 0,068 до 0,0015 при характерной высоте вихря h_1 равной 1, 5 и 15 мм соответственно (рис. 3). Можно отметить, что прочих равных условиях значения параметра S уменьшаются, что указывает на увеличение роли центробежных эффектов вследствие более длительного воздействия врачающегося потока на частицы, как отмечалось выше. Таким образом, при значениях величины h_1 более 5 мм центробежное воздействие становится определяющим фактором инерционного разделения.

При увеличении скорости истечения газа из прямоугольной прорези W_{sl} в диапазоне 1-5 м/с безразмерный параметр S изменяется от 0,047 до 0,002, от 0,099 до 0,004 и от 0,16 до 0,008 при диаметре вихря d_s равного 10, 15 и 20 мм соответственно (рис. 4). Можно отметить, что при $W_{sl} \geq 1,35$ м/с доля гравитационного вклада в процесс сепарации становится менее 10 % для диапазона диаметров вихря d_s от 10 до 25 мм при его высоте

$h_1 = 1$ мм, что свидетельствует о доминировании центробежных сил даже при сравнительно низких значениях скорости истечения.

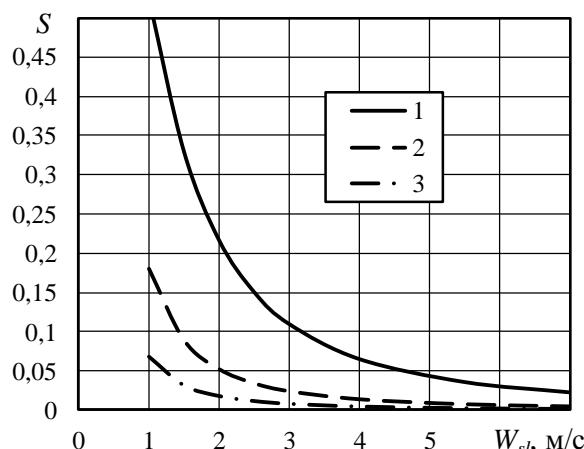


Рис. 3 – Зависимость относительного вклада гравитационных сил S в процесс сепарации частиц из запыленного газа от скорости его истечения W_{sl} при различных значениях характерной высоты вихря h_1 , мм: 1 – 1; 2 – 5; 3 – 15. Базовое значение $d_s = 15$ мм

Fig. 3 – Dependence of the relative contribution of gravitational forces S to the separation of particles from a dusty gas on the velocity of its outflow W_{sl} at different values of the characteristic height of the vortex h_1 , mm: 1 – 1; 2 – 5; 3 – 15. Base value $d_s = 15$ mm

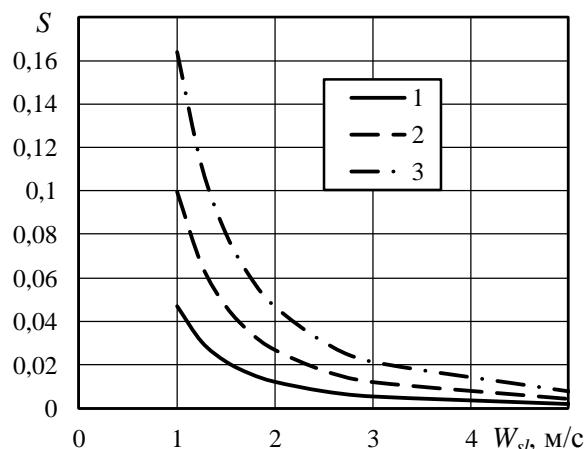


Рис. 4 – Зависимость относительного вклада гравитационных сил S в процесс сепарации частиц из запыленного газа от скорости его истечения W_{sl} при различных диаметрах вихря d_s , мм: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20. Базовое значение $h_1 = 1$ мм

Fig. 4 – Dependence of the relative contribution of gravitational forces S to the separation of particles from a dusty gas on the velocity of its outflow W_{sl} at different vortex diameters d_s , mm: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20. The base value of $h_1 = 1$ mm

Таким образом, разработанная аналитическая модель и проведённый анализ обеспечивают основу для инженерной оценки условий эффективного фракционирования частиц. Полученные результаты подтверждают применимость предложенного

подхода для проектирования и оптимизации работы мультивихревого воздушного пылеуловителя-классификатора с учётом особенностей распределения сил в их рабочем объёме. При увеличении скорости циркуляции и оптимальном выборе геометрических характеристик зоны вращения значение параметра S стремится к нулю, что указывает на полное доминирование центробежных сил и минимизацию гравитационного влияния.

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Предложена конструкция мультивихревого пылеуловителя-классификатора с направляющими дугообразными элементами для улавливания и фракционирования мелкодисперсных твёрдых частиц, позволяющая минимизировать их унос из аппарата за счёт снижения вероятности многократного отражения частиц от стенок в сторону соседних вихрей в кольцевом пространстве.

2. Разработано аналитическое выражение для оценки диаметра граничного зерна разделения и безразмерного параметра S , отражающего относительное влияние гравитационного механизма.

3. При скоростях истечения газа W_{sl} более 3,1 м/с и $h_1 = 1$ мм значение параметра S становится менее 10 %, что указывает на доминирование центробежного механизма над гравитационным при сепарации частиц из газопылевого потока.

4. Увеличение характерной высоты вихря h_1 и уменьшение его диаметра d_s приводят к снижению параметра S , усиливая центробежные эффекты и повышая эффективность разделения.

Литература

- С. О. Анисимов. Получение сорбентов на основе силикагеля методом сборки на поверхности: галогенирование силикагеля. Молодая фармация – потенциал будущего: Сборник материалов XII всероссийской научной конференции студентов и аспирантов с международным участием, Санкт-Петербург, 62-64 (2022).
- A. Navabi, M. Vandadi, T. Bond, V. Rahneshin. Deformation and cracking phenomena in cold sprayed 6061 Al alloy powders with nanoscale aluminum oxide films. Materials Science and Engineering, **841**, 143036 (2022).
- M. Wang, X.i Huang, Z. Feng, C. Xia, D. Meng, Z. Yu. Behavior of sulfate in preparation of single light rare earth carbonate by Mg (HCO₃)₂ precipitation method. Journal of Rare Earths, **39**, 7, 850-857 (2021).
- C. R. Pérez, S.-H. Yeon, J. Segalini, V. Presser. Structure and Electrochemical Performance of Carbide-Derived Carbon Nanopowders. Advanced Functional Materials, **23**, 8, 1081-1089 (2013).
- Precedence Research. Chemical Catalyst Market Size to Hit USD 57.14 Bn by 2034 // Режим доступа: <https://www.precedenceresearch.com/chemical-catalyst-market>.
- Precedence Research. Powder Coating Market Size, Trends & Forecast // Режим доступа: <https://www.precedenceresearch.com/powder-coating-market>.
- Precedence Research. Calcium Carbonate Market Size, Share, Report 2024-2033 // Режим доступа: <https://www.precedenceresearch.com/calcium-carbonate-market>.

8. Precedence Research. Titanium Powder Market Size, Share, Growth Report 2024-2033 // Режим доступа: <https://www.precedenceresearch.com/titanium-powder-market>.
9. K. D. Caldwell, B. J. Compton, J. C. Giddings, R. J. Olson. *Sedimentation field-flow fractionation: a method for studying particulates in cataractous lens*. Investigative Ophthalmology & Visual Science, **25**, 2, 153-159 (1984).
10. B. O. T. Maldonado, R. Ran, K. L. Galloway, Q. Brosseau. *Phase separation during sedimentation of dilute bacterial suspensions*. Physics of Fluids, **34**, 11, 113305 (2021).
11. J. Rivera, K. Silveru, Y. Li. *A comprehensive review on pulse protein fractionation and extraction: Processes, functionality, and food applications*. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, **64**, 13, 4179-4201 (2024).
12. J.-Y. Lin, R.-M. Wu. *Three Output Membrane Hydrocyclone: Classification and Filtration*. Molecules, **24**, 6, 1116-1126 (2019).
13. M. G. Morimoto, D. P. Silva, D. Silva, M. A. Barrozo, L. G. M. Vieira. *Filtering hydrocyclone performance: A review of literature*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1-14 (2025).
14. M. Y. Jaffrin. *Hydrodynamic techniques to enhance membrane filtration*. Annual Review of Fluid Mechanics, **44**, 1, 77-96 (2012).
15. G. Z. Kyzas, K. A. Matis. *Flotation in water and wastewater treatment*. Processes, **6**, 8, 116 (2018).
16. R. Johansson, M. Evertsson. *An empirical study of a gravitational air classifier*. Minerals Engineering, **31**, 10-16 (2012).
17. W.-H. Lai, W.-F. Lu, M.-C. Chou. *Sorting of fine powder by gravitational classification chambers*. Advanced Powder Technology, **20**, 177-184 (2009).
18. S. Routray, R. B. Rao. *Classification Studies in an Advanced Air Classifier*. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, **97**, 2, 129-134 (2016).
19. C. J. King. *Fractionation of Solid Particles*. Separation Processes, 2, 446-478 (2013).
20. И. В. Постникова, С. В. Воробьев, А. М. Козлов, М. Ю. Колобов. *Сепарация продуктов избирательного измельчения апатит-нефелиновой руды*. Современные научно-исследовательские технологии. Региональное приложение, **4**, 76, 96-102 (2023).
21. Y. Yu, M. Saadat, A. Untaroiu, B. R. Thomas, H. G. Wood. *Prediction of turbo air classifier cut size based on particle trajectory*. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 57903 (2016).
22. M. Adamčík. *Limit Modes of Particulate Materials Classifiers*. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 121 (2017).
23. Y. Zeng, S. Zhang, Y. Zhou, M. Li. *Numerical Simulation of a Flow Field in a Turbo Air Classifier and Optimization of the Process Parameters*. Processes, **8**, 2, 237 (2020).
24. J. Wang, Y. Du, Y. Wang, J. Li. *Computational Analysis of a Counter-Rotating Classifier for Sub-Micron Powder Classification*. Advanced Powder Technology, **33**, 2, 103440 (2022).
25. B. Pan, W.-S. Chen, D. Liping, C. Xu. *Classifier selection using geometry preserving feature*. Neural Computing and Applications, **35**, 28, 20955-20976 (2023).
26. D. Lim, Y. S. Ong, R. Seltiawan, M. Idris. *Classifier-assisted constrained evolutionary optimization for automated geometry selection of orthodontic retraction spring*. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 1-8 (2010).
27. M. Esmaeilpour, A. Mohebbi, V. Ghalandari. *CFD simulation and optimization of an industrial cement gas-solid air classifier*. Particuology, **89**, 172-184 (2024).
28. А. Ю. Васина. *Обоснование технико-экономической эффективности применения мультивихревого сепаратора-классификатора*. Материалы XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции, Казань, 70-73 (2022).
29. К. В. Локотунина, М. А. Басыров. *Экономический анализ работы мультивихревого классификатора*. Сборник статей по материалам Международной молодежной научной конференции, 515-518 (2022).
30. H. Owinoowski. *Cut size determination of centrifugal classifier with fluidized bed*. Archives of Mining Sciences, **58**, 3, 823-841 (2013).
31. В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, А. М. Мугинов. *Влияние конструктивного оформления статического мультивихревого классификатора на эффективность фракционирования частиц силикагеля*. Башкирский химический журнал, **30**, 4, 99-106 (2023).
32. М. А. Прец, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, А. М. Мугинов. *Численное исследование влияния геометрических параметров мультивихревого классификатора на эффективность фракционирования частиц*. Вестник Технологического университета, **28**, 4, 63-68 (2025).
33. В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, К. С. Моисеева. *Промышленные испытания фракционирования сыпучего материала в мультивихревом классификаторе-сепараторе*. Вестник Технологического университета, **25**, 4, 58-63 (2022).
34. А. Р. Галимова, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, В. В. Харьков. *Сепарационное устройство с соосно расположенным трубами для разделения водонефтяных эмульсий*. Вестник Технологического университета, **24**, 3, 50-54 (2021).

References

1. S. O. Anisimov. *Preparation of silica gel-based sorbents by surface assembly: halogenation of silica gel*. Young Pharmacy - the potential of the future: Proceedings of the XII All-Russian Scientific Conference of Students and Postgraduates with international participation, St. Petersburg, 62-64 (2022)
2. A. Navabi, M. Vandadi, T. Bond, V. Rahnechin. *Deformation and cracking phenomena in cold sprayed 6061 Al alloy powders with nanoscale aluminum oxide films*. Materials Science and Engineering, **841**, 143036 (2022)
3. M. Wang, X.i Huang, Z. Feng, C. Xia, D. Meng, Z. Yu. *Behavior of sulfate in preparation of single light rare earth carbonate by Mg (HCO3) 2 precipitation method*. Journal of Rare Earths, **39**, 7, 850-857 (2021)
4. C. R. Pérez, S.-H. Yeon, J. Segalini, V. Presser. *Structure and Electrochemical Performance of Carbide-Derived Carbon Nanopowders*. Advanced Functional Materials, **23**, 8, 1081-1089 (2013)
5. Precedence Research. Chemical Catalyst Market Size to Hit USD 57.14 Bn by 2034 // Access mode: <https://www.precedenceresearch.com/chemical-catalyst-market> .
6. Precedence Research. Powder Coating Market Size, Trends & Forecast // Access mode: <https://www.precedenceresearch.com/powder-coating-market> .
7. Precedence Research. Calcium Carbonate Market Size, Share, Report 2024-2033 // Access mode: <https://www.precedenceresearch.com/calcium-carbonate-market> .
8. Precedence Research. Titanium Powder Market Size, Share, Growth Report 2024-2033 // Access mode: <https://www.precedenceresearch.com/titanium-powder-market> .
9. K. D. Caldwell, B. J. Compton, J. C. Giddings, R. J. Olson. *Sedimentation field-flow fractionation: a method for studying particulates in cataractous lens*. Investigative Ophthalmology & Visual Science, **25**, 2, 153-159 (1984)

10. B. O. T. Maldonado, R. Ran, K. L. Galloway, Q. Brosseau. *Phase separation during sedimentation of dilute bacterial suspensions*. Physics of Fluids, **34**, 11, 113305 (2021)
11. J. Rivera, K. Siliveru, Y. Li. *A comprehensive review on pulse protein fractionation and extraction: Processes, functionality, and food applications*. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, **64**, 13, 4179-4201 (2024)
12. J.-Y. Lin, R.-M. Wu. *Three Output Membrane Hydrocyclone: Classification and Filtration*. Molecules, **24**, 6, 1116-1126 (2019)
13. M. G. Morimoto, D. P. Silva, D. Silva, M. A. Barrozo, L. G. M. Vieira. *Filtering hydrocyclone performance: A review of literature*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1-14 (2025)
14. M. Y. Jaffrin. *Hydrodynamic techniques to enhance membrane filtration*. Annual Review of Fluid Mechanics, **44**, 1, 77-96 (2012)
15. G. Z. Kyzas, K. A. Matis. *Flotation in water and wastewater treatment*. Processes, **6**, 8, 116 (2018)
16. R. Johansson, M. Evertsson. *An empirical study of a gravitational air classifier*. Minerals Engineering, **31**, 10-16 (2012)
17. W.-H. Lai, W.-F. Lu, M.-C. Chou. *Sorting of fine powder by gravitational classification chambers*. Advanced Powder Technology, **20**, 177-184 (2009)
18. S. Routry, R. B. Rao. *Classification Studies in an Advanced Air Classifier*. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, **97**, 2, 129-134 (2016)
19. C. J. King. *Fractionation of Solid Particles*. Separation Processes, 2, 446-478 (2013)
20. I. V. Postnikova, S. V. Vorobyov, A.M. Kozlov, M. Y. Kolobov. *Separation of products of selective crushing of apatite-nepheline ore*. Modern high-tech technologies. Regional Annex, **4**, 76, 96-102 (2023)
21. Y. Yu, M. Saadat, A. Untaroiu, B. R. Thomas, H. G. Wood. *Prediction of turbo air classifier cut size based on particle trajectory*. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 57903 (2016)
22. M. Adamčík. *Limit Modes of Particulate Materials Classifiers*. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 121 (2017)
23. Y. Zeng, S. Zhang, Y. Zhou, M. Li. *Numerical Simulation of a Flow Field in a Turbo Air Classifier and Optimization of the Process Parameters*. Processes, **8**, 2, 237 (2020)
24. J. Wang, Y. Du, Y. Wang, J. Li. *Computational Analysis of a Counter-Rotating Classifier for Sub-Micron Powder Classification*. Advanced Powder Technology, **33**, 2, 103440 (2022)
25. B. Pan, W.-S. Chen, D. Liping, C. Xu. *Classifier selection using geometry preserving feature*. Neural Computing and Applications, **35**, 28, 20955-20976 (2023)
26. D. Lim, Y. S. Ong, R. Seltiawan, M. Idris. *Classifier-assisted constrained evolutionary optimization for automated geometry selection of orthodontic retraction spring*. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 1-8 (2010)
27. M. Esmaeilpour, A. Mohebbi, V. Ghalandari. *CFD simulation and optimization of an industrial cement gas-solid air classifier*. Participology, **89**, 172-184 (2024)
28. A. Y. Vasina. *Substantiation of the technical and economic efficiency of using a multi-vortex classifier separator*. Proceedings of the XVII All-Russian Open Youth Scientific and Practical Conference, Kazan, 70-73 (2022)
29. K. V. Lokotunina, M. A. Basyrov. *Economic analysis of the multi-vortex classifier*. Collection of articles based on the materials of the International Youth Scientific Conference, 515-518 (2022)
30. H. Otwinowski. *Cut size determination of centrifugal classifier with fluidized bed*. Archives of Mining Sciences, **58**, 3, 823-841 (2013)
31. V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, A.M. Muginov. *The effect of the design of a static multi-vortex classifier on the fractionation efficiency of silica gel particles*. Bashkir Chemical Journal, **30**, 4, 99-106 (2023)
32. M. A. Prets, V. E. Zinurov, A.V. Dmitriev, A.M. Muginov. *Numerical study of the influence of geometric parameters of a multi-vortex classifier on the efficiency of particle fractionation*. Herald of Technological University, **28**, 4, 63-68 (2025)
33. V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, K. S. Moiseeva. *Industrial tests of fractionation of bulk material in a multi-vortex classifier separator*. Herald of Technological University, **25**, 4, 58-63 (2022)
34. A. R. Galimova, V. E. Zinurov, A.V. Dmitriev, V. V. Kharkov. *A separation device with coaxially arranged pipes for separating oil and water emulsions*. Herald of Technological University, **24**, 3, 50-54 (2021)

© М. А. Прец – ст. преп. кафедры Инженерной графики (ИГ), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Россия, precmari@mail.ru; В. Э. Зинуров – к.т.н., и.о. зав. кафедрой Инженерная графика, КГЭУ, vadd_93@mail.ru; А. В. Дмитриев – д.т.н., проф., зав. кафедрой Автоматизации технологических процессов и производств, КГЭУ, ieremiada@gmail.com; В. А. Вдовина – студент, КГЭУ, vik.ktor.ria@mail.ru.

© М. А. Prets – Senior Lecturer, Department of Engineering Graphics (EG), Kazan State Energy University (KSPEU), Kazan, Russia, precmari@mail.ru; В. Е. Зинуров – PhD (Technical Sci.), Acting Head of the of Engineering Graphics department, KSPEU, vadd_93@mail.ru; А.В. Дмитриев – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Productions, KSPEU, ieremiada@gmail.com; В. А. Вдовина – Student, KSPEU, vik.ktor.ria@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 17.06.25.

Дата принятия рукописи в печать – 06.10.25.