



УДК 621.928.37

DOI:10.31677/2311-0651-2024-43-1-175-184

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОЙ ВОРОНКИ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЦИКЛОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.А. Пшенов, кандидат технических наук, доцент

С.С. Блёскин, аспирант

Новосибирский государственный аграрный университет

E-mail: moonlait2510@mail.ru

Ключевые слова: пневмотранспорт, циклон, комбикормовый мини-завод, компьютерное моделирование, вихревая воронка, двухступенчатый циклон.

Реферат. Установлено, что на комбикормовых мини-заводах с производительностью до 5 т/ч системы пневмотранспорта с циклоном-разгрузителем являются более перспективными в связи с меньшим выбросом мелкодисперсного компонента. Однако таких цехов на рынке меньше из-за меньшего объема загрузки горизонтальных смесителей, на которых установлены циклоны, по сравнению с вертикальными смесителями, выполняющими функцию циклонов-разгрузителей, у которых выбросы мелкой пыли в рабочую зону выше, что отрицательно сказывается на условиях труда, здоровье работников, а также пожарной безопасности помещений. Для снижения выбросов мелкой пыли в выхлопной патрубок циклона предложено техническое решение в виде двухступенчатого циклона. Предварительная экспериментальная проверка на лабораторной модели показала увеличение улавливания частиц на 32% по отношению к серийному циклону-разгрузителю ЦР при одинаковых начальных условиях и в одном типоразмере. В рамках проектирования полноразмерной версии предложенного двухступенчатого циклона проведено компьютерное моделирование процесса отделения в программной среде FlowSimulation с габаритами, приближенными к серийно выпускаемому циклону БЦР-450, с целью выявления влияния геометрических параметров вихревой воронки на процесс отделения мелкодисперсных частиц от транспортирующего воздушного потока при переменных геометрических размерах диаметра и высоты вихревой воронки в диапазоне от 100 до 270 и от 100 до 235 мм соответственно. Обоснованы предварительные рациональные геометрические параметры диаметра вихревой воронки, равного 180 мм, и высоты, равной 150 мм, предлагаемого технического решения при коэффициенте гидравлического сопротивления 8,4.

JUSTIFICATION OF DESIGN PARAMETERS OF A TWO-STAGE CYCLONE VORTEX FUNNEL USING COMPUTER SIMULATION

E.A. Pshenov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

S.S. Blyoskin, PhD student

Novosibirsk State Agrarian University

Keywords: pneumatic transport, cyclone, mini-feed mill, computer modeling, vortex funnel, two-stage cyclone.

Abstract. *It has been established that in mini-feed mills with a productivity of up to 5 t/h, pneumatic transport systems with a cyclone unloader are more promising due to the lower emission of finely dispersed components. However, there are fewer such workshops on the market due to the smaller loading volume of horizontal mixers on which cyclones are installed compared to vertical mixers that perform the function of cyclone-unloaders, in which emissions of fine dust into the work area are higher, which negatively affects working conditions, health of workers, as well as fire safety of premises. To reduce emissions of fine dust into the exhaust pipe of the cyclone, a technical solution in the form of a two-stage cyclone was proposed. A preliminary experimental test on a laboratory model showed an increase in particle collection by 32% about the serial cyclone-unloader CR under the same initial conditions and in the same standard size. As part of the design of a full-size version of the proposed two-stage cyclone, computer modeling of the separation process was carried out in the FlowSimulation software environment with dimensions close to the commercially produced cyclone BCR-450 to identify the influence of the geometric parameters of the vortex funnel on the process of separation of fine particles from the transporting air flow with variable geometric dimensions diameter and height of the vortex funnel in the range from 100 to 270 and from 100 to 235 mm, respectively. Preliminary rational geometric parameters of the vortex funnel diameter equal to 180 mm and height equal to 150 mm of the proposed technical solution with a hydraulic resistance coefficient of 8.4 are substantiated.*

Развивающееся животноводство — залог продовольственной безопасности страны. Современный уровень развития кормопроизводства во многом определяется совершенствованием технологического оборудования для производства кормов, в частности производства комбикормов. В соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента России № 20 от 21.01.2020 [1], предполагается развивать производство комбикормов, кормовых добавок для животных, минеральных добавок, в том числе за счет внедрения конкурентоспособных отечественных технологий, основанных на новейших достижениях науки [2].

Комбикормовые заводы большой производительности (более 5 т/ч) оснащены системами автоматизированного управления и контроля производственного процесса, имеют развитые системы аспирации и пылеулавливания, отвечающие за пожарную и экологическую безопасность производства, в то время как комбикормовые мини-заводы (менее 5 т/ч) имеют сокращенную упрощенную технологическую схему производства и примитивную систему очистки воздуха от пыли, выделяемой в результате дробления зерна. На сегодняшний день доля таких самостоятельных комбикормовых цехов на рынке не более 12 % [3]. При этом отмечено, что для крупных животноводческих хозяйств выгодно организовать собственное локальное производство комбикормов в целях снижения себестоимости продукции [3, 4]. Очевидно, что такие хозяйства должны иметь большие посевные площади для обеспечения собственной кормовой базы. Таким образом, большинство из них не может располагаться в относительной транспортной доступности от промышленных комбикормовых заводов. С учетом того, что основную массовую долю в комбикормах занимают зерновые компоненты, производимые на тех же крупных животноводческих предприятиях, совершенствование и внедрение внутрихозяйственных комбикормовых заводов и цехов является актуальной задачей.

В ходе анализа технологического процесса производства комбикормов на комбикормовом мини-заводе установлено, что на всех заводах с пневматической самовсасывающей молотковой дробилкой применяется пневмотранспорт для загрузки дробилки и транспортировки полученных продуктов измельчения зерна в смеситель. При этом циклон-разгрузитель применяется только с горизонтальными смесителями, а для очистки воздуха используют тканый фильтр-мешок, установленный на выхлопном патрубке циклона. Вертикальные смесители выполняют роль циклона-разгрузителя, система очистки воздуха также реализована посредством тканых фильтр-мешков, которые имеют низкую эффективность очистки. Как результат, в производ-

ственное помещение выбрасывается мелкая мучная пыль, что сказывается на пожарной и экологической безопасности. О.Н. Бахчевников и др. [4] отмечают, что для работы контейнеров-заводов одним из нерешенных вопросов является эффективность аспирации контейнеров. Кроме того, при производстве гранулированных, экструдированных или ферментированных кормов на основе зерновых культур выбрасываемая мучная фракция является ценным компонентом.

Системы с использованием циклона являются более предпочтительными, поскольку эффективность циклонов по пылеулавливанию достигает 95 – 98 %.

Таким образом, одной из важных проблем комбикормового мини-завода является вынос мелкодисперсного компонента в выхлопной патрубок циклона.

Похожей проблеме посвящена диссертация А.Г. Титова [5], в которой отмечен вторичный унос пыли в выхлопной патрубок циклонов на промышленных предприятиях, а также при очистке сбросных газов от пыли в электроэнергетике и в экспериментах по уменьшению уноса Д.И. Мисюля и др. [6, 7] предприняли попытку решения проблемы вторичного уноса пыли в химической промышленности посредством внедрения определенных раскручивателей непосредственно в выходной патрубок циклона. Ряд авторов [8] предлагают рассмотреть пути повышения эффективности работы газоочистного оборудования на примере использования электрофильтров в качестве средства для выделения из потока мелкодисперсных частиц.

В качестве технического решения указанной проблемы предложена конструкция двухступенчатого циклона [9]. При этом изготовлен экспериментальный образец и проведены сравнительные лабораторные испытания с серийно выпускаемым циклоном-разгрузителем одного типоразмера. Предлагаемое решение показало снижение выброса мучнистой фракции в выхлопной патрубок циклона на 32 % по сравнению с циклоном-разгрузителем при одинаковых начальных условиях [10].

Настоящие исследования направлены на обоснование конструктивных параметров предлагаемого двухступенчатого циклона на этапе его проектирования для условий работы непосредственно на комбикормовом мини-заводе с использованием программного обеспечения SolidWorks Flow Simulation. Существуют и другие решения для компьютерного моделирования течений в циклоне, такие как AnsysFluent, FlowVision и др. На их основе изучается ряд вопросов распределения полей скоростей, траектории движения частиц, сопротивления потока, движения газопылевой смеси в циклонных аппаратах [11–13].

Целью нашей работы является обоснование конструктивных параметров вихревой воронки предложенной конструкции двухступенчатого циклона посредством моделирования процесса сепарации частиц в циклоне с использованием пакета SolidWorks Flow Simulation.

Критерием обоснования конструктивных параметров вихревой воронки является количество частиц, вынесенных в выхлопной патрубок циклона, при постоянном значении числа запускаемых в циклон частиц.

Задачей исследования являлось определение:

- рационального входного диаметра вихревой воронки;
- рациональной высоты вихревой воронки;
- коэффициента гидравлического сопротивления при каждом изменении конструктивного параметра вихревой воронки.

Конструктивные параметры вихревой воронки, которые подвергались изменению, и общий вид конструкции представлены на рис. 1, а, а именно: $d_{\text{вх}}$ – входной диаметр вихревой воронки и h – высота вихревой воронки. Высота цилиндрической вставки и её диаметр оставались неизменными и составили 0,4 м и 0,348 м соответственно.

Остальные геометрические размеры двухступенчатого циклона, которые оставались неизменными, представлены на рис. 1, б. На данном этапе исследований для имитации рабочей емкости смесителя свободно спроектирован герметичный бункер под сбор фракции.

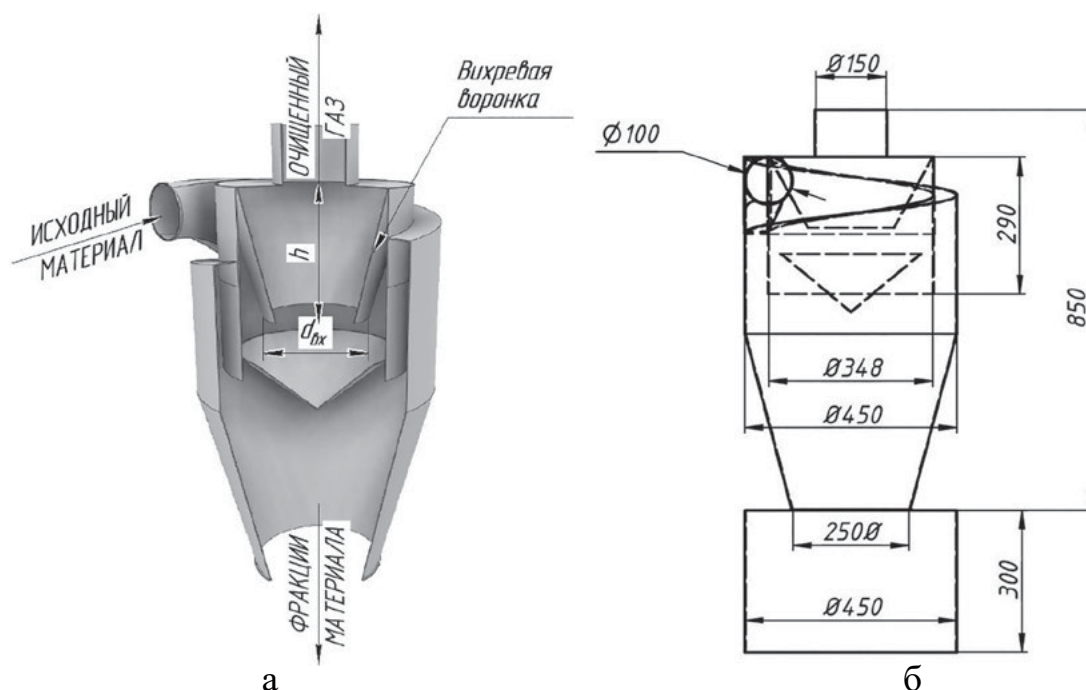


Рис. 1. Циклон двухступенчатый:

а – общий вид циклона; б – геометрия циклона

Two-stage cyclone: а – general view of the cyclone; б – cyclone geometry

Измерения проводились путем запуска пяти фракций различной размерности: I (10 мкм); II (30 мкм); III (50 мкм); IV (70 мкм); V (90 мкм); VI (110 мкм); VII (130 мкм); VIII (150 мкм). Плотность частиц пыли комбикормов различных рецептов находится в интервале 1,51 – 1,56 кг/м³ [14]. В расчетах плотность принята 1,56 кг/м³.

Количество запущенных в циклон частиц для всех измерений в изменяемых конструкциях оставалось неизменным – 1000 шт. Входной диаметр воронки $d_{вх}$ изменялся в диапазоне от 100 до 270 мм с шагом 5 мм, высота воронки h – в диапазоне от 100 до 235 мм с шагом 5 мм.

Скорость воздушного потока на входе в циклон определялась экспериментальным путем с использованием прибора Testo 405i по методике ГОСТ 12.3.018-79 [15]. На имеющемся циклоне БЦР-450, установленном на комбикормовом заводе производства «АгроПоставка», в лаборатории Инженерного института НГАУ, скорость составила 20 м/с, что соответствует рабочему диапазону скоростей 16 – 28 м/с на входе в циклонные аппараты. Картина в сечении, показывающая область распределения давлений при изменении геометрических размеров диаметра (а) и высоты (б) вихревой воронки по всему объему двухступенчатого циклона, представлена на рис. 2.

На выхлопном патрубке циклона задано нормальное атмосферное давление 101325 Па. Текущая среда – воздух, температура и плотность которого составляла 293,2 К и 1,21 кг/м³ соответственно. Тип указанной задачи – внутренний с указанной гравитацией вдоль вертикальной оси циклона 9,81 м/с², с ламинарным и турбулентным типом течения, интенсивность турбулентного течения 2 % с масштабом 0,00450284 м. Шероховатость внутренних стенок циклона принята 0,6 мкм. Генерация сетки – в автоматическом режиме с общим количеством ячеек около 1100000 и около 140000 ячеек на разделе твердого тела с текучей средой.

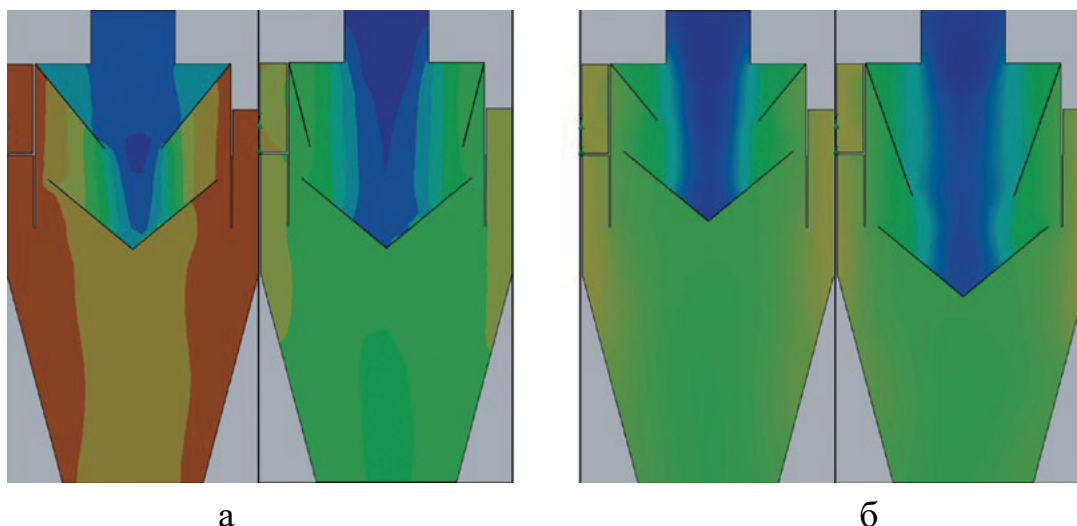


Рис. 2. Картина в сечении:

а – поле распределение давлений в циклоне при изменении диаметра воронки (слева – 100 мм, справа – 270 мм); б – поле распределение давлений в циклоне при изменении высоты воронки (слева – 100 мм, справа – 235 мм)

Sectional picture:

a – field of pressure distribution in the cyclone when the diameter of the funnel changes (on the left – 100 mm, on the right – 270 mm); b – pressure distribution field in the cyclone when the funnel height changes (on the left – 100 mm, on the right – 235 mm)

После определения наиболее рационального диаметра вихревой воронки на выбранном диаметре проведен ряд запусков, определяющих наиболее рациональную высоту вихревой воронки.

В качестве критерия эффективности сепарации выбран общий коэффициент улавливания циклоном η . Так как исходный материал представлен восемью фракциями, то η определялся как среднеарифметический по формуле (1):

$$\eta = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 + \eta_7 + \eta_8}{n} \quad (1)$$

где $\eta_1, \dots, \eta_8$ – коэффициенты улавливания фракции;

n – количество запущенных фракций.

Коэффициент улавливания $\eta_1, \dots, \eta_8$ характеризуется отношением количества фактически уловленных частиц M_{y-i} к его количеству в исходной смеси M_{o-i} и находится по формуле

$$\eta_i = \frac{M_{y-i}}{M_{o-i}} = \frac{1000 - N_{\text{ВЫЛ}}}{1000}, \quad (2)$$

где $N_{\text{ВЫЛ}}$ – количество частиц, вылетевших в выхлопной патрубок, шт.

Определение коэффициента гидравлического сопротивления циклона проводилось без бункера. Граничные условия: скорость во входном патрубке 20 м/с, на выходе из циклона атмосферное давление. Глобальная цель задана по массовому расходу воздуха, поверхностные цели – по среднестатистическому давлению на входе и выходе из циклона. Количество заданных итераций – 1000.

Коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывался по формуле Юлиуса Вейсбаха:

$$\varepsilon = \frac{P_{01} - P_{02}}{\frac{\rho V^2}{2}}, \quad (3)$$

где P_{01} – давление на выходе, Па;

P_{02} – давление на входе, Па;

ρ – плотность среды, кг/м³;

V – средняя скорость, м/с.

Определение коэффициента гидравлического сопротивления позволит рассчитать рациональные конструктивные параметры предлагаемого двухступенчатого циклона с учетом энергозатрат для обеспечения необходимого воздушного потока в системе пневмотранспорта на комбикормовом мини-заводе.

В ходе проведенных запусков для изменяемых параметров конструкции вихревой воронки, в частности, её входного диаметра получены зависимости, представленные на рис. 3.

Установлено, что при входном диаметре воронки в интервалах от 100 до 150 и от 175 до 200 мм количество унесенных в выхлопной патрубок частиц наименьшее для всех фракций в исследуемом диапазоне.

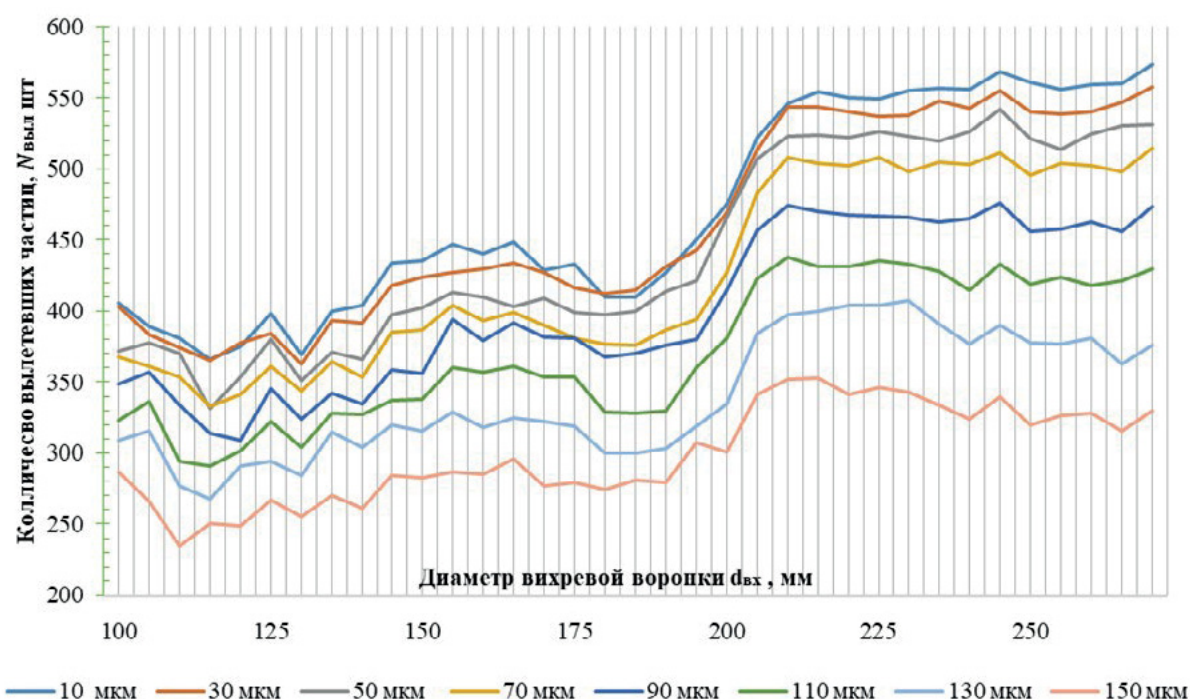


Рис. 3. Зависимость количества частиц, вынесенных в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от величины диаметра вихревой воронки

Dependence of the number of particles carried into the exhaust pipe of a two-stage cyclone on the diameter of the vortex funnel

На рис. 4 представлен усреднённый график критерия эффективности сепарации при изменении диаметра вихревой воронки от 100 до 270 мм совместно с коэффициентом гидравлического сопротивления.

Следует отметить снижение коэффициента гидравлического сопротивления циклона в интервале диаметров от 100 до 200 мм (см. рис. 3) с 18 до 8, а после 200 мм он стабилизируется на уровне 7 – 7,5.

По полученным данным можно выделить область в интервале от 165 до 180 мм, где прослеживается увеличение эффективности отделения частиц до 0,64 – 0,65 и уменьшение коэффициента гидравлического сопротивления до 8, что довольно близко к стабилизированному значению 7 – 7,5.

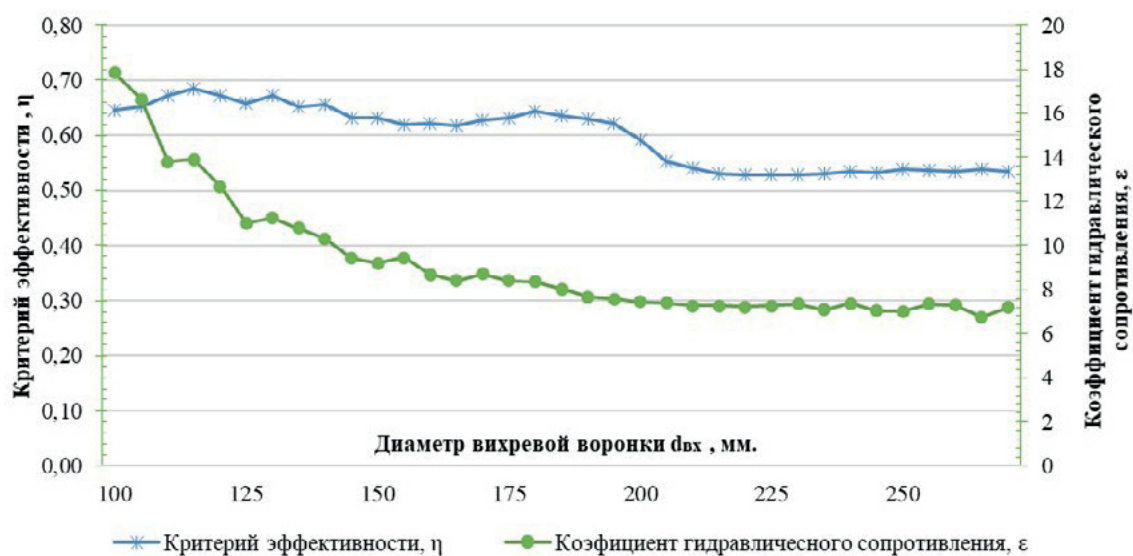


Рис. 4. Критерии эффективности в зависимости от входного диаметра вихревой воронки
Efficiency criteria depend on the inlet diameter of the vortex funnel

По конструктивным соображениям для дальнейших исследований входной диаметр вихревой воронки принят $d_{\text{вх}} = 180$ мм, при котором коэффициент эффективности равен 0,64, а коэффициент гидравлического сопротивления 8.

При фиксированном диаметре воронки 180 мм полученные зависимости количества вынесенных частиц по фракциям в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от высоты воронки представлены на рис. 5.

На графике прослеживается уменьшение количества вылетевших фракций в выхлопной патрубок циклона в диапазоне от 140 до 170 мм, а с 170 до 210 мм, напротив, наблюдается увеличение количества вылетевших фракций.

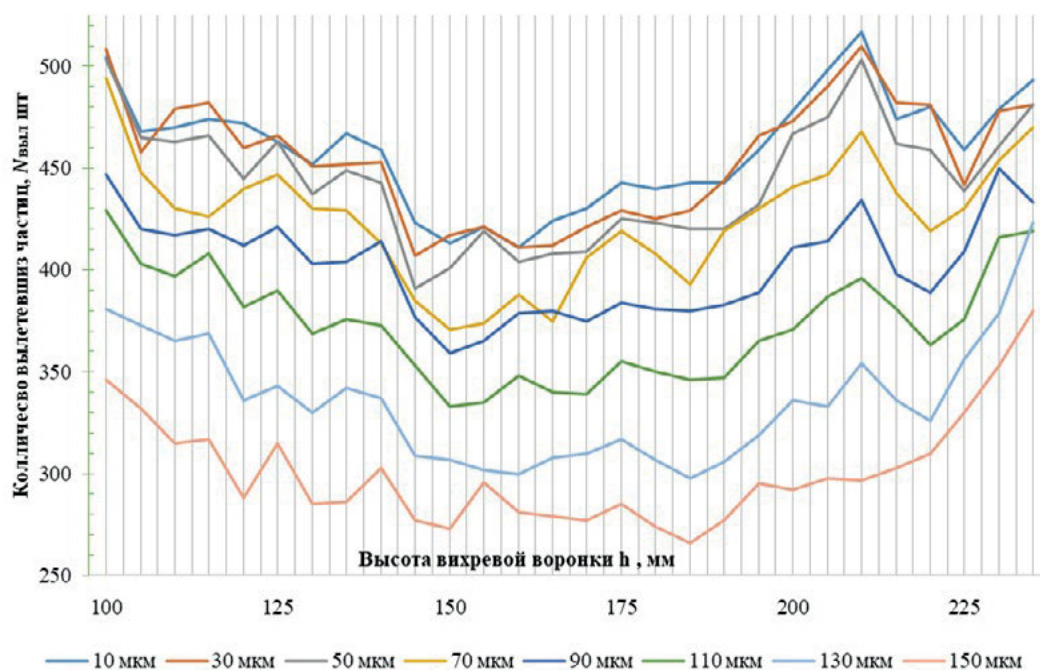


Рис. 5. Зависимость количества вынесенных частиц в выхлопной патрубок двухступенчатого циклона от изменения величины высоты воронки
Dependence of the number of particles carried into the exhaust pipe of a two-stage cyclone on changes in the height of the funnel

На рис. 6 представлен усреднённый график критерия эффективности сепарации при изменении высоты вихревой воронки, на котором прослеживается увеличение эффективности отделения частиц от воздушного потока в диапазоне от 145 до 165 мм, пиковая эффективность отделения составила 0,64 при высоте вихревой воронки 150 мм, при этом коэффициент гидравлического сопротивления равен 8,31.

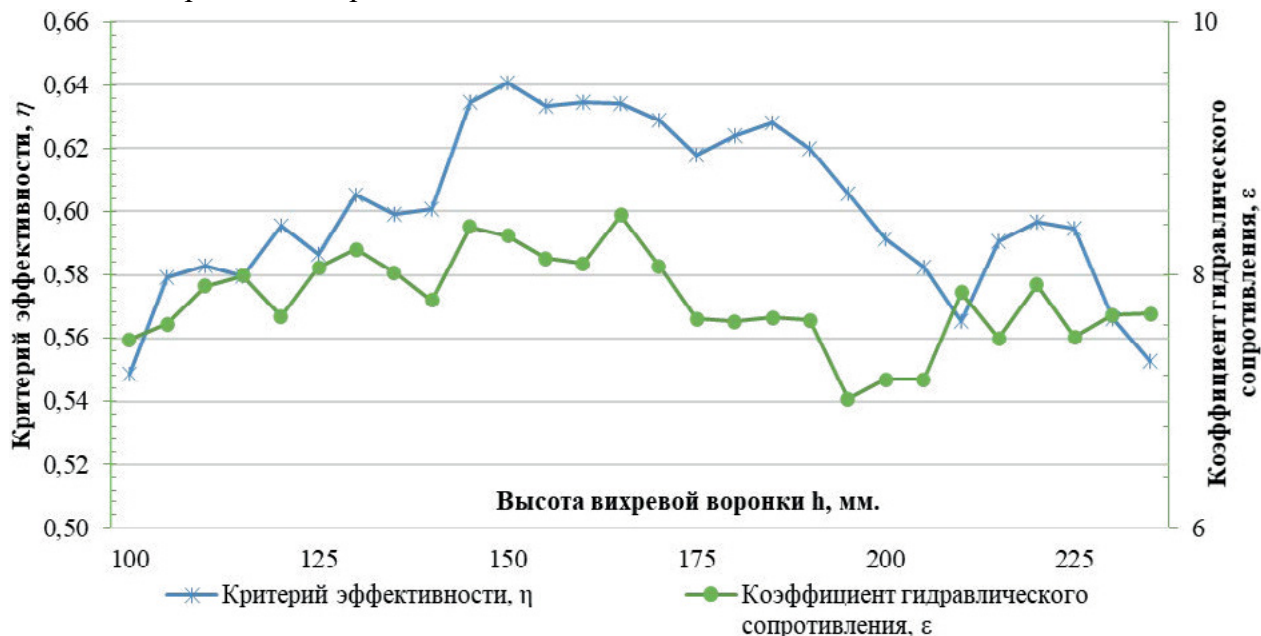


Рис. 6. Критерии эффективности в зависимости от высоты вихревой воронки
Efficiency criteria depending on the height of the vortex funnel

Принимаем высоту воронки 150 мм, при которой получено относительно наименьшее количество унесенных фракций с принятой размерностью: I (10 мкм) – 413 шт.; II (30 мкм) – 417 шт.; III (50 мкм) – 401 шт.; IV (70 мкм) – 371 шт.; V (90 мкм) – 359 шт.; VI (110 мкм) – 333 шт.; VII (130 мкм) – 307 шт.; VIII (150 мкм) – 273 шт. При этом коэффициент эффективности составил 0,64, а коэффициент гидравлического сопротивления – 8,31.

Анализ полученных зависимостей для дальнейших исследований позволил установить наиболее рациональные конструктивные параметры вихревой воронки, а именно: диаметр на входе $d_{\text{вх}} = 180$ мм и высота $h = 150$ мм.

Таким образом, в ходе проведенного численного моделирования при изменяемых параметрах вихревой воронки двухступенчатого циклона получены следующие результаты.

1. Изменение входного диаметра вихревой воронки оказывает явное влияние на количество частиц, вынесенных в выхлопной патрубок циклона, и поддается прогнозированию. Установлено, что наименьшее количество унесённых частиц получено при диаметрах $d_{\text{вх}} = 175 - 200$ мм. Принят $d_{\text{вх}} = 180$ мм при коэффициенте гидравлического сопротивления $\epsilon = 8,39$.

2. Высота вихревой воронки также оказывает влияние на эффективность работы двухступенчатого циклона и поддается прогнозированию. Наибольшая эффективность отделения частиц наблюдается при диапазоне высоты вихревой воронки h от 145 до 165 мм. Конструктивно принята высота $h = 150$ мм при коэффициенте гидравлического сопротивления $\epsilon = 8,31$.

3. Входной диаметр вихревой воронки оказывает существенное влияние на гидравлическое сопротивление двухступенчатого циклона. Зависимость носит приближенный характер полинома четвертой степени. С увеличением входного диаметра в интервале от 100 до 270 мм коэффициент гидравлического сопротивления упал с 18 до 7.

4. Высота вихревой воронки на гидравлическое сопротивление существенно не влияет. В исследуемом интервале высот от 100 до 235 мм средний коэффициент гидравлического сопротивления составил $\varepsilon = 7,79$ при максимальном скачке до 8,47.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния других конструктивных параметров двухступенчатого циклона на эффективность его работы, а также его сравнение с существующим циклоном-разгрузителем БЦР-450, установленным на комбикормовом заводе «АгроПоставка», с применением программного обеспечения SolidWorks Flow Simulation.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации*: Указ Президента Российской Федерации от 21.01.2020 // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. – 2020. – № 20.
2. *Оценка современного состояния отечественного рынка комбикормов в условиях новой экономической реальности* / И.Е. Кузнецов, Е.И. Закурдаева, К.А. Бражникова, К.В. Матухнова [Электронный ресурс] // Вестник ВГУИТ. – 2022. – № 2 (92). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sovremennogo-sostoyaniya-otechestvennogo-rynka-kombikormov-v-usloviyah-novoy-ekonomicheskoy-realnosti> (дата обращения: 08.01.2024).
3. *Коняев Н.В., Трубников В.Н.* Тенденции развития комбикормового производства // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 9. – С. 140–146. – EDN: QKXUXH.
4. *Бахчевников О.Н., Бенюха Е.В., Брагинцев С.В.* Современные локальные малые предприятия на примере комбикормовых заводов // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 8 (87). – С. 58–78. – DOI: 10.24412/FeYLDNm5QaM; EDN: XYTGRL.
5. *Титов А.Г.* Интенсификация процесса пылеулавливания в электроциклоне путем снижения вторичного уноса: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск, 2014. – 20 с.
6. *Мисюля Д.И., Кузьмин В.В., Марков В.А.* Применение лопастного раскручивателя в циклонных пылеуловителях // Труды БГТУ. – 2011. – № 3. – С. 162–169.
7. *Мисюля Д.И., Кузьмин В.В., Марков В.А.* Разработка раскручивающего устройства для циклонных аппаратов и определение его параметров // Теоретические основы химической технологии. – 2013. – № 3. – С. 331.
8. *Чекалов Л.В., Гузаев В.А., Смирнов М.Е.* Основные пути повышения эффективности работы газоочистного оборудования в цементной промышленности // Alitinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2008. – № 3-4 (4-5). – С. 28–37.
9. *Патент на полезную модель № 208117 U1* Российская Федерация, МПК B04C 9/00, B01D 45/12. Циклон: № 2021106836: заявл. 15.03.2021; опубл. 03.12.2021 / Е.А. Пшенов, А.А. Мезенов, М.Л. Вертей [и др.]; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет». – EDN: EZWRGT.
10. *Пшенов Е.А., Блескин С.С.* Разработка двухступенчатого циклона // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2023. – Т. 53, № 2. – С. 101–109. – DOI: 10.26898/0370-8799-2023-2-13; EDN: DWNIBS.
11. *Расчет гидродинамики потоков в возвратно-поточных циклонах при помощи пакета прикладных программ flow vision* / Ю.Г. Чесноков, И.Г. Лихачев, О.М. Флисюк [и др.] [Электронный ресурс] // Российский химический журнал. – 2022. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-gidrodinamiki-potokov-v-vozvratno-potochnyh-tsiklonah-pri-pomoschi-paketa-prikladnyh-programm-flow-vision> (дата обращения: 06.02.2024).
12. *Алексеев К.А., Мухаметзянова А.Г.* Моделирование работы газового циклона в среде ANSYS Fluent // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2020. – Т. 6. – С. 36–39. – EDN: FBWISW.
13. *Анализ влияния геометрических размеров выхлопной трубы циклона на степень его очистки с помощью компьютерного моделирования* / И.И. Чемезов, Г.Е. Леченко, К.Р. Волков, А.В. Маслеев [и др.] [Электронный ресурс] // Вестник евразийской науки. – 2020. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/>

article/n/analiz-vliyanija-geometricheskih-razmerov-vyhlopnoy-truby-tsiklona-na-stepen-ego-ochistki-s-pomoschyu-kompyuternogo-modelirovaniya (дата обращения: 06.02.2024).

14. Исследование процесса улавливания пыли на зерноперерабатывающих предприятиях / Е.А. Рудыка, Е.В. Батурина, О.А. Семенихин, А.А. Калачев [Электронный ресурс] // Вестник ВГТУ. – 2009. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-ulavlivaniya-pyli-na-zernopererabatyvayuschih-predpriyatiyah> (дата обращения: 28.01.2023)
15. ГОСТ 12.3.018-79 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – М., 1979.

REFERENCES

1. *Sobranie aktov Prezidenta i Pravitel'stva Rossijskoj Federacii*, 2020, No. 20.
2. Kuznecov I.E., Zakurdaeva E.I., Brazhnikov K.A., Matuhnova K.V., *Vestnik VGUIT*, 2022, No. 2 (92), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sovremennogo-sostoyaniya-otchestvennogo-rynka-kombikormov-v-usloviyah-novoy-ekonomicheskoy-realnosti> (January 08, 2024) (In Russ.)
3. Konyaev N.V., Trubnikov V.N., *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skhozajstvennoj akademii*, 2022, No. 9, pp. 140–146, EDN: QKXUXX. (In Russ.)
4. Bahchevnikov O.N., Benova E.V., Braginec S.V., *Vestnik NGIEI*, 2018, No. 8 (87), pp. 58–78, DOI: 10.24412/FeYLDNm5QaM; EDN: XYTGLR. (In Russ.)
5. Titov A.G. *Intensifikaciya processa pileulavlivaniya v elektrociklone putem snizheniya vtorichnogo unosa* (Intensification of the dust collection process in an electric cyclone by reducing secondary entrainment), Abstract of the Dissertation of the Candidate of Chemical Sciences, Tomsk, 2014, 20 p. (In Russ.)
6. Misulya D.I., Kuz'min V.V., Markov V.A., *Trudy BGTU*, 2011, No. 3, pp. 162–169. (In Russ.)
7. Misulya D.I., Kuz'min V.V., Markov V.A., *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*, 2013, No. 3, p. 331. (In Russ.)
8. Chekalov L.V., Guzaev V.A., Smirnov M.E., *Alitinform: Cement. Beton. Suhie smesi*, 2008, No. 3-4 (4-5), pp. 28–37. (In Russ.)
9. Pshenov E.A., Mezenov A.A., Vertej M.L. [i dr.], *Patent na poleznuyu model' № 208117 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK B04C 9/00, B01D 45/12. Ciklon: № 2021106836* (Utility Model Patent No. 208117 U1 Russian Federation, IPC B04C 9/00, B01D 45/12. Cyclone: No. 2021106836), Zayavl. 15.03.2021, Opubl. 03.12.2021, EDN: EZWRGT.
10. Pshenov E.A., Bleskin S.S., *Sibirskij vestnik sel'skhozajstvennoj nauki*, 2023, Vol. 53, No. 2, pp. 101–109, DOI: 10.26898/0370-8799-2023-2-13; EDN: DWNIBS. (In Russ.)
11. Chesnokov Yu.G., Lihachev I.G., Flisyuk O.M. [i dr.], *Rossijskij himicheskij zhurnal*, 2022, No. 3, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-gidrodinamiki-potokov-v-vozvratno-potochnyh-tsiklonah-pri-pomoschi-paketa-prikladnyh-programm-flow-vision> (February 06, 2024)
12. Alekseev K.A., Muhametzyanova A.G., *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah – MMTT*, 2020, Vol. 6, pp. 36–39, EDN: FBWISW. (In Russ.)
13. Chemezov I.I., Lechenko G.E., Volkov K.R., Masleev A.V. [i dr.], *Vestnik evrazijskoj nauki*, 2020, No. 4, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyanija-geometricheskih-razmerov-vyhlopnoy-truby-tsiklona-na-stepen-ego-ochistki-s-pomoschyu-kompyuternogo-modelirovaniya> (February 06, 2024)
14. Rudyka E.A., Baturina E.V., Semenihih O.A., Kalachev A.A., *Vestnik VGTU*, 2009, No. 3, available at: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-ulavlivaniya-pyli-na-zernopererabatyvayuschih-predpriyatiyah> (January 28, 2023) (In Russ.)
15. ГОСТ 12.3.018-79 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний (ГОСТ 12.3.018-79 System of Occupational Safety Standards (SSBT). Ventilation systems. Aerodynamic Test Methods.), Moscow, 1979.