

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-94-103

***Киреев В.Е., Уваров В.А., Киреев В.М., Попов Е.Н., Ткач Л.В.**

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

*E-mail: vova-kireev-1997@mail.ru

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АСПИРАЦИИ С РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫМ ЗАТВОРОМ

Аннотация. В статье представлена новая конструкция узла подачи рециркуляционного воздуха для аспирационных систем обеспыливания перегрузочных узлов. Работа предлагаемой конструкции узла основывается на возникновении дополнительного эффекта Коанда, который возникает при расположении последовательно нескольких Коандовских каналов и был впервые выявлен при участии авторов статьи. Применяя данный эффект, авторы предлагают инновационную технологию, направленную на улучшение аэрогидродинамической эффективности и повышение энергосбережения аспирационной системы. Приведены условия проведения и результаты как численного, так и натурного экспериментов, по результатам обработки экспериментальных данных определены наиболее рациональные режимы работы конструкции и его геометрические параметры, даны рекомендации по его использованию.

Разработанная технология отличается высоким уровнем универсальности и перспективностью применения в промышленности, особенно там, где необходимы значительные объемы перекачиваемого воздуха и высокая интенсивность образования пыли, как, например, в металлургическом, строительном и перерабатывающих секторах экономики.

Результаты статьи открывают широкие перспективы для масштабного внедрения данной технологии в промышленные отрасли, где имеются промышленные системы аспирации, с учетом снижения энергопотребления. Материал, изложенный в статье, может стать основой для дальнейших инженерных разработок и модернизации существующих систем аспирации.

Ключевые слова: эффект Коанда, рециркуляция, энергоэффективность, коэффициент местного сопротивления, системы аспирации, перегрузочные желоба.

Введение. Технологические процессы транспортирования, перегрузки и переработки сыпучих материалов сопровождаются интенсивным выделением мелкодисперсной пыли, попадание которой в рабочую зону приводит к загрязнению воздушной среды и возникновению профессиональных заболеваний [1–4]. Наиболее распространенной технологической операцией является транспортирование материала по закрытым желобам, при котором происходит эжекция воздуха и образование избыточного давления в месте выгрузки [5–8]. Для исключения поступления запыленного воздуха в рабочую зону применяются различные методы обеспыливания, наиболее эффективным из которых является использование аспирационных систем. Традиционная компоновка аспирационной системы включает аспирационное укрытие, пылеочистное оборудование, вентилятор и сеть воздухопроводов. Производительность системы аспирации определяется в первую очередь объемами удаляемого воздуха [9]. Наиболее эффективным способом снижения энергопотребления является применение частичной рециркуляции, при которой очищенный воздух возвращается к источнику пылеобразования [10].

Материалы и методы. На сегодняшний день имеется множество работ, касающихся исследования аэродинамических параметров рециркуляционных потоков в аспирационных системах [11, 12], однако интересным решением является вопрос разработки узлов подачи рециркуляционного воздуха с использованием эффекта Коанда для повышения энергоэффективности систем обеспыливания [13, 14]. Несмотря на перспективность направления, на сегодняшний день данный вопрос недостаточно исследован. Ранее нами был разработан узел подачи рециркуляционного воздуха, обеспечивающий помимо возврата части аспирируемого воздуха, значительное снижение объемов эжекции (рис. 1) [15].

Принцип работы предлагаемой конструкции основан на использовании указанного дополнительного эффекта Коанда, возникающего при использовании нескольких последовательно расположенных каналов, впервые выявленный при участии авторов. При перегрузке, с верхнего конвейера 11 в укрытие 1 сыпучий материал 12, например, железная руда, движется по перегрузочному желобу 3 вниз, эжектируя воздух, создавая тем самым воздушный запыленный поток. При падении сыпучего материала на конвейерную ленту 2 создается зона повышенного давления. Для обеспечения санитарно-гигиенических

условий мест перегрузки сыпучего материала, т.е. не выбивания воздушного запыленного потока, из короба 1 вентилятором 5 через аспирационный патрубок 4 отсасывается воздух, который поступает по напорному патрубку 6 в пылеочистное оборудование 7. Очищенный воздух по патрубку 8 поступает в атмосферу или в следующую ступень очистки (на фиг. не показана), а рециркуляционный поток по воздуховоду 9 отводится в распределители воздушно-пылевого концентрата 10, расположенные последовательно. Благодаря уникальной конструкции каналов с выгнутой криволинейной поверхностью, возникает эффект Коанда, за счет которого рециркуля-

ционный поток «прилипает» к верхней грани перегрузочного желоба 3. Последовательное размещение воздушно-рециркуляционных каналов вызывает дополнительный эффект Коанда, способствующий заметному повышению аэродинамического сопротивления эжекционному потоку и, соответственно, снижению его расхода. Для исследования аэродинамических характеристик воздушно-рециркуляционного затвора была реализована трёхэтапная экспериментальная методология. Основная цель исследований заключалась в определении рациональных геометрических и аэродинамических параметров устройства, при условии минимального энергопотребления.

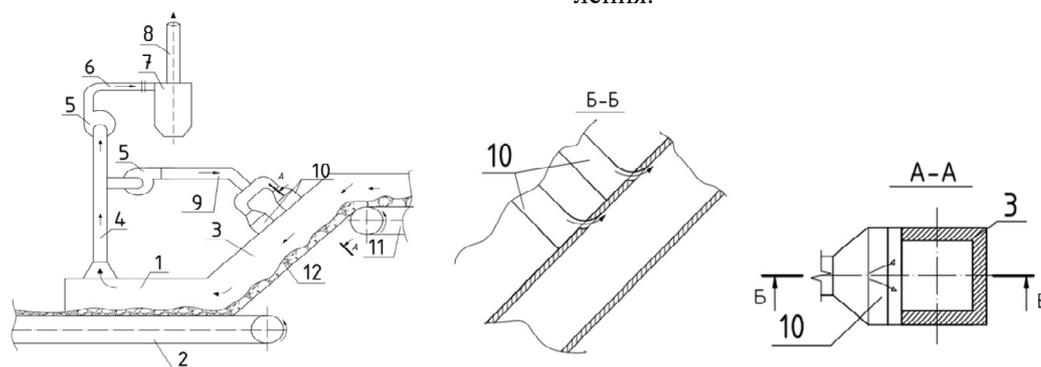


Рис. 1 Узел перегрузки с рециркуляцией аспирируемого воздуха: 1 – нижнее аспирационное укрытие с коробом; 2 – нижний ленточный конвейер; 3 – перегрузочный желоб; 4 – аспирационный воздуховод; 5 – вентиляторы; 6 – напорный патрубок; 7 – циклон; 8 – патрубок отвода очищенного воздуха; 9 – рециркуляционный воздуховод; 10 – распределители воздушно-пылевого потока с рециркуляционными Коандовскими каналами; 11 – верхний ленточный конвейер; 12 – перегружаемый материал

При проведении экспериментального исследования были приняты следующие допущения, позволившие корректно интерпретировать результаты экспериментов при сохранении достаточной точности измерений: горизонтальное расположение желоба рециркуляционной системы; равномерное движение воздуха по желобу; приближение условий эксперимента к нормальным. Принятые допущения позволили существенно упростить математическое описание исследуемых процессов и обеспечить воспроизводимость результатов. Горизонтальная ориентация системы исключает влияние гидростатического давления на распределение параметров потока, допущение об установившемся течении позволяет применять классические уравнения аэродинамики в упрощенной форме, а поддержание нормальных условий эксперимента обеспечивает возможность использования табличных значений физических свойств воздуха и корректного расчета критериев подобия. Данные допущения не оказывают существенного влияния на точность получаемых результатов, поскольку отклонения реальных условий от модели находятся в пределах допустимых погрешностей измери-

тельной аппаратуры и соответствуют требованиям, предъявляемым к экспериментальным исследованиям в области промышленной вентиляции и аспирации.

Постановка задачи. Методы расчета. Первый этап исследования включал численное моделирование с использованием программного комплекса SOLIDWORKS COSMOS FloWorks – осуществлялась верификация расчетной сетки, которая заключалась в её подборе при дискретизации исследуемых объектов и проводилась в следующей последовательности: построение и выбор математической модели турбулентного течения на основе уравнений Навье-Стокса с $k-\epsilon$ моделью турбулентности [16], определение контрольных параметров (геометрических соотношений и режимных характеристик), выбор начальной сетки, моделирование с последующим измельчением расчетной сетки, анализ полученных результатов, выявление уровня адаптации сетки, при котором наблюдается незначительное влияние её измельчения на контрольные параметры.

Для решения поставленной задачи принимались начальные (физические параметры среды, характерные для нормальных условий) и гранич-

ные условия исследуемой модели. Рассматривались условия возникновения дополнительного эффекта Коанда в перегрузочном желобе.

В качестве граничных условий были приняты (рис. 2): стенки желоба с нулевой шероховатостью. Для имитации возникновения эжекционного давления во входном сечении 1 задавалась скорость эжекционного потока, равная 3 м/с, поверхность 2 была задана как давление окружающей среды 101325 Па. Критерием эффективности работы устройства был принят коэффициент местного сопротивления (КМС) исследуемого рециркуляционного узла $\zeta_{узл}$ как параметр, наилучшим образом подходящий для расчета объема эжектируемого воздуха и последующего внедрения в существующую методику проектирования.

В качестве факторов эксперимента были приняты следующие параметры: соотношения внутреннего R_1 и внешнего радиусов R_2 рециркуляционных каналов R_1/R_2 , отношение начальной скорости воздуха в рециркуляционном канале $V_{p(нач)}$ и начальной скорости воздуха в желобе $V_{ж(нач)}$, соотношения расстояния рециркуляционного канала h к ширине желоба b . Выбранные параметры учитывают как геометрические, так и гидродинамические особенности исследуемого узла.

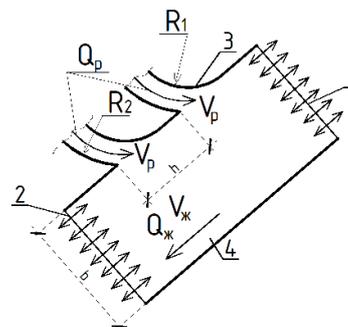


Рис. 2. Граничные условия численного эксперимента: 1 – поверхность входа эжектируемого потока, с определенной скоростью; 2 – поверхность выхода потока (давление окружающей среды); 3 – рециркуляционные каналы; 4 – нижняя кромка перегрузочного желоба

Полученные результаты численного эксперимента требовали экспериментальной валидации, в связи с чем на втором этапе был выполнен натурный эксперимент на созданной нами лабораторной установке. Схема экспериментальной установки представлена на (рис. 3). Сопоставление данных численного и натурального эксперимента позволило оценить адекватность математической модели.

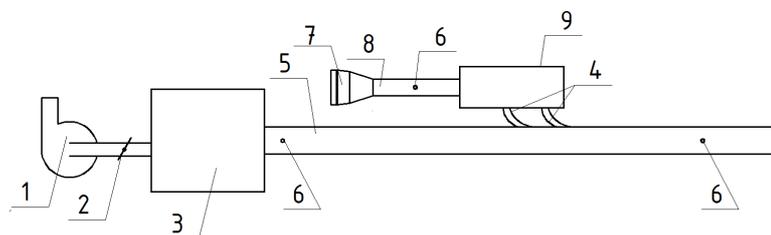


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки: 1 – центробежный вентилятор ВР-8677М-3,15 ОН с частотным преобразователем; 2 – шибер; 3 – камера статического давления; 4 – рециркуляционные каналы; 5 – прямоугольный воздухопровод, выступающий в роли перегрузочного желоба сечением 300×300 мм; 6 – места подключений дифманометра; 7 – центробежный вентилятор канального типа СК160 с частотным преобразователем; 8 – воздухопровод, оцинкованный сечением Ø160 мм; 9 – камера статического давления для подачи рециркуляционного воздуха в каналы 4

В ходе натурных экспериментальных исследований проводились измерения аэродинамических параметров воздушного потока в характерных сечениях. План измерений включал определение скорости воздуха, статического, динамического и полного давлений в точках до и после рециркуляционного канала. Для детального изучения структуры потока выполнялись измерения динамического давления в шестнадцать точек контрольного сечения, расположенных в соответствии с методикой равных площадей, что позволило получить поля скоростей и оценить степень неравномерности течения. Потери давления определялись с помощью цифрового дифманометра, скорости потоков с помощью термоанемометра.

На заключительном третьем этапе было проведено повторное численное моделирование с целью дополнительной валидации результатов и уточнения параметров модели с учётом данных, полученных в ходе натурального эксперимента. Такой подход обеспечил взаимную валидацию теоретических и экспериментальных данных. Сравнение результатов натурального и численного эксперимента производилось с использованием коэффициента корреляции Пирсона, который позволяет определить степень линейных связей между исследуемыми переменными, другими словами, определяется степень, с которой значения двух переменных пропорциональны друг другу. Определение квадрата корреляции Пир-

сона между переменными производилось для выявления количества дисперсии общей между двумя переменными.

Результаты и обсуждения. Анализ научных работ, направленных на оптимизацию аэродинамических характеристик аспирационных систем, позволяет идентифицировать два основных подхода к минимизации объемов пылевых выбросов. Первый подход базируется на уменьшении отдельных составляющих общего объема аспирации, второй – на внедрении технологии рециркуляции части аспирируемого воздушного потока.

Объемы аспирации АС определяются выражением:

$$Q_a = Q_{ж} + Q_n, \quad (1)$$

где $Q_{ж}$ – количество воздуха, поступающее в укрытие по желобу под действием эжектирующих свойств сыпучего материала и нагнетающей способности технологического оборудования; Q_n – объемы воздуха, просасываемые через неплотности укрытия.

Существенную долю в структуре общего объема аспирации составляет величина $Q_{ж}$, особенно при наличии протяженных желобов и значительной высоте падения сыпучего материала, обуславливающих интенсивное эжектирование воздуха в нижнее укрытие.

Согласно исследованиям О.Д. Нейкова и И.Н. Логачева [17, 18], а также В.А. Минко [18, 19, 20], движение воздуха в желобе, вызванное эжектирующим воздействием падающего сыпучего материала, описывается как течение в канале с заданными гидравлическими характеристиками, обусловленное действием разности давлений. Для общего случая перегрузки сыпучих материалов без подогрева объема воздуха, транспортируемые по желобу в нижнее аспирационное укрытие, определяются выражением:

$$Q_{ж} = F \sqrt{\frac{P_э \pm P_{об} + \Delta P_y}{0,5\rho \sum \xi}} \quad (2)$$

где F – площадь поперечного сечения желоба; $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местного сопротивления (КМС) желоба и укрытия; $P_{об}$ – давление, развиваемое рабочими органами аспирируемого оборудования; $P_{об}$ – разность давлений, обусловленная действием местного отсоса (разрежение в укрытии P_y); $P_э$ – эжекционное давление.

Единственным управляемым параметром, обеспечивающим снижение объемов аспирации в производственных условиях, является повышение гидравлического сопротивления тракта перемещения эжектируемого воздушного потока по маршруту "верхнее укрытие – желоб – нижнее укрытие".

Гидравлическое сопротивление указанного тракта обуславливается суммарным КМС, вычисляемым по формуле:

$$\sum \zeta = \zeta_{вх} + \zeta_0 + \zeta_{пер} + \zeta_{узл}, \quad (3)$$

где $\zeta_{вх}$ – КМС, определяющий сопротивление входа воздуха в верхнее укрытие; ζ_0 – КМС перегрузочного желоба; $\zeta_0=1,5$ для вертикальных желобов; $\zeta_0=2,5$ при наличии наклонного участка; $\zeta_{пер}$ – КМС вертикальной жесткой перегородки укрытия с жесткой перегородкой; в аспирационных укрытиях без перегородки $\zeta_{пер}=0$; $\zeta_{узл}$ – КМС внедряемого рециркуляционного узла.

Таким образом, увеличение коэффициента местного сопротивления узла $\zeta_{узл}$ приводит к росту гидравлического сопротивления тракта "верхнее укрытие – желоб – нижнее укрытие", что обуславливает снижение объема воздуха $Q_{ж}$, поступающего в нижнее укрытие по желобу. В связи с этим величина коэффициента местного сопротивления $\zeta_{узл}$ является основным критерием оценки эффективности функционирования, рассматриваемого воздушно-рециркуляционного затвора. Поэтому в эксперименте определялось влияние выбранных факторов на $\zeta_{узл}$ и уравнения регрессии.

Коэффициент местного сопротивления узла $\zeta_{узл}$ определялся на основании результатов численного эксперимента как:

$$\zeta_{узл} = \frac{\Delta P}{\frac{V_{жс}^2}{2} \cdot \rho} \quad (4)$$

где ΔP – потери давления в перегрузочном желобе, создаваемые рециркуляционным узлом, определялись как разность давлений на входе и выходе $P1-P2$ из рассматриваемого участка желоба, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Для исследования влияния варьируемых факторов использовался центральный композиционный ротатабельный план (ЦКРП) (табл. 1). Выбор ЦКРП обусловлен необходимостью построения квадратичных математических моделей при существенном сокращении числа экспериментов. Дополнительным преимуществом является возможность последовательного планирования: при неадекватности линейной модели переход к квадратичной достигается добавлением звездных и центральных точек без повторения ранее выполненных опытов ядра плана.

Задача проведенного эксперимента заключалась в исследовании аэродинамических характеристик рециркуляционного узла, которая выражалась в определении сопротивления движению воздуха в модели перегрузочного желоба.

В ходе эксперимента были выявлены факторы, влияющие на работу рассматриваемой конструкции: как показала обработка результатов эксперимента, определяющим фактором является скорость в рециркуляционных V_p , вторым по значимости является шаг рециркуляционных каналов h .

Таблица 1

Область факторного пространства ЦКРП

Факторы	Уровни варьирования					Шаг
	-1,68	-1	0	+1	+1,68	
R_1/R_2	0,81	0,85	0,9	0,95	0,98	0,05
$V_p/V_{жс}$	2,31	3	4	5	5,68	1
h/b	0,21	0,35	0,55	0,75	0,89	0,2

В результате обработки экспериментальных данных первого численного эксперимента были получены уравнения регрессии для определения

потерь давления и КМС в исследуемом диапазоне (табл.1):

$$\Delta P = 184,4 - 358,23 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 197,98 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 - 3,81 \cdot \frac{V_p}{V_{жс}} + 2,12 \left(\frac{V_p}{V_{жс}} \right)^2 - 32,7 \cdot \frac{h}{b} +$$

$$+ 18,61 \left(\frac{h}{b} \right)^2 + 0,23 \frac{R_1}{R_2} \frac{V_p}{V_{жс}} - 0,31 \frac{R_1}{R_2} \frac{h}{b} + 3,93 \frac{V_p}{V_{жс}} \frac{h}{b}$$

$$\zeta_{уэл} = 34,15 - 66,34 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 36,66 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 - 0,71 \cdot \frac{V_p}{V_{жс}} + 0,39 \left(\frac{V_p}{V_{жс}} \right)^2 - 6,05 \cdot \frac{h}{b} +$$

$$+ 3,45 \left(\frac{h}{b} \right)^2 + 0,04 \frac{R_1}{R_2} \frac{V_p}{V_{жс}} - 0,06 \frac{R_1}{R_2} \frac{h}{b} + 0,73 \frac{V_p}{V_{жс}} \frac{h}{b}$$

Проанализировав полученные результаты (5), (6) установлено, что в рамках исследуемого диапазона (табл. 1) оптимальными значениями конструктивно режимных параметров являются: $R_1/R_2 = 0,98$; $V_p/V_{жс} = 5,68$; $h/b = 0,89$, а в случае расширения диапазона установлено, что увеличение $V_p/V_{жс}$ или $L_p/L_{жс}$ и уменьшения R_1/R_2 до 0,7 значения $\zeta_{уэл}$ и ΔP возрастает.

Для подтверждения результатов численного эксперимента и уточнения параметров работы исследуемой конструкции было проведено натурное исследование.

Для этой цели была разработана специальная экспериментальная установка (рис. 4) со след геометрическими параметрами: $h=225$ мм; $h/b = 0,89$; $R_1=52$ мм; $R_2=74$ мм; $R_1/R_2 = 0,7$.

Основным элементом экспериментальной установки являлся узел 9 с рециркуляционными каналами 4, на исследование которого была направлена следующая часть экспериментальных исследований. Элементы рециркуляционного узла (рис 5) были выполнены из оцинкованного листового металла.



Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки:

1 — камера статического давления; 2 — центробежный вентилятор ВР-8677М-3,15 ОН с частотным преобразователем; 3 — центробежный вентилятор канального типа СК160 с частотным преобразователем; 4 — камера статического давления для подачи рециркуляционного воздуха в рециркуляционные каналы; 5 — оцинкованный воздуховод сечением $\varnothing 160$ мм; 6 — прямоугольный воздуховод, выступающий в роли перегрузочного желоба сечением 300x300 мм; 7 — места подключений дифманометра



Рис. 5. Конструкция узла экспериментальной установки с рециркуляционными каналами

Экспериментальная установка работает следующим образом. Центробежный вентилятор 1 ВР-8677М-3,15 ОН с частотным преобразователем подает воздух из помещения в камеру статического давления 3 для выравнивания пульсации скорости и давлений. Из камеры 3 воздух подается в квадратный канал сечением 300x300 мм, который в данной установке выступает в качестве перегрузочного желоба, а подача воздуха имитирует возникновение эжекционного давления. Для подачи рециркуляционного воздуха предусмотрен центробежный вентилятор канального типа СК160 с частотным преобразователем, который подает предварительно воздух в камеру статического давления 9. Из камеры 9 по двум воздушным-рециркуляционным каналам 4 воздух подается непосредственно в желоб-воздуховод 5. Для снятия показаний скорости потока и перепада давлений предусмотрены соответствующие отверстия 6. Снятие показаний перепада

давлений при различных скоростях подачи рециркуляционного воздуха позволило определить эффективности работы рассматриваемой конструкции.

Исследование работы технического устройства выполнялось в диапазонах расходов рециркуляционного воздуха, который составлял 100÷600 м³/ч и эжекционного воздуха 600÷1700 м³/ч, что позволило выявить наиболее эффективные режимы работы рассматриваемой конструкции.

На заключительном, третьем этапе было проведено повторное численное моделирование, которое полностью повторяет второй этап экспериментального исследования (рис. 4) и позволило дополнительно подтвердить достоверность полученных ранее результатов и скорректировать план дальнейших исследований.

На рисунках 6 и 7 мы видим, что увеличение $V_P/V_{Ж}$ ($a - 2,61$; $b - 3,41$; $в - 4,19$) приводит к повышению $\zeta_{уст}$ ($a - 6,46$; $b - 11,03$; $в - 13,1$) и ΔP ($a - 11,5$ Па; $b - 17$ Па; $в - 19$ Па) в желобе.

На основании комплексного анализа результатов всех трех этапов исследования было установлено, что наиболее эффективная устойчивая работа рециркуляционного узла достигается при следующих безразмерных параметрах: отношение шага каналов к высоте желоба $h/b = 0,75$, отношение радиусов рециркуляционных каналов $R_1/R_2 = 0,7$ и отношение скоростей рециркуляционного и эжектируемого потоков $V_P/V_{Ж} = 16$.

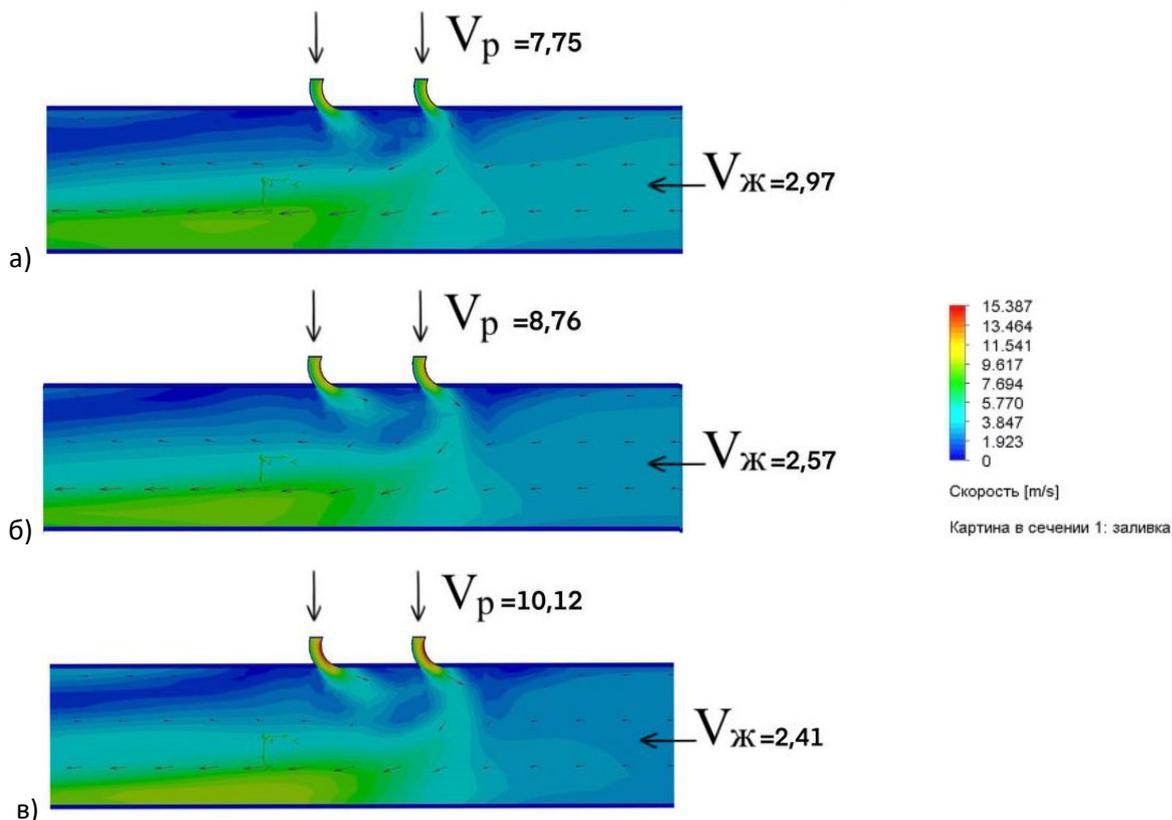


Рис. 6. Распределение поля скоростей в исследуемом желобе

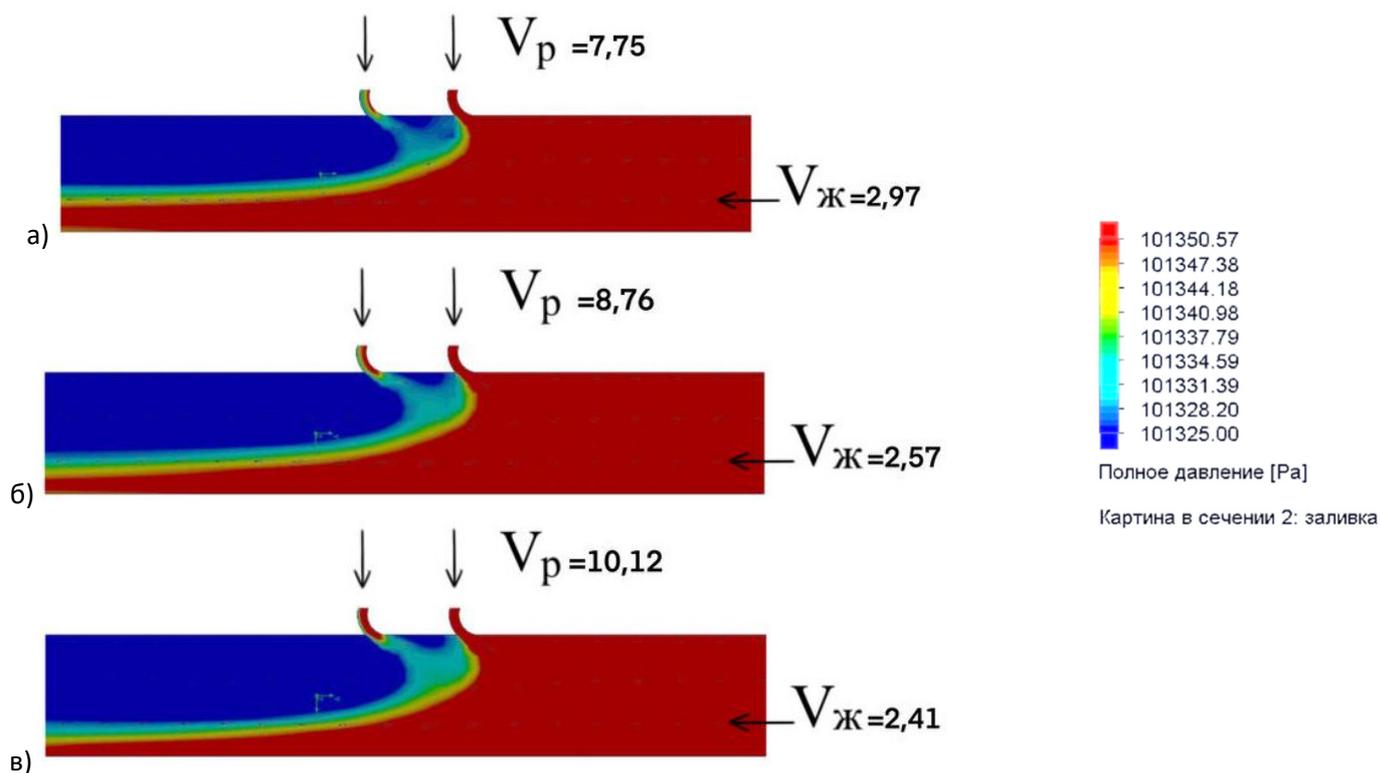


Рис. 7. Распределение полного давления в исследуемом желобе

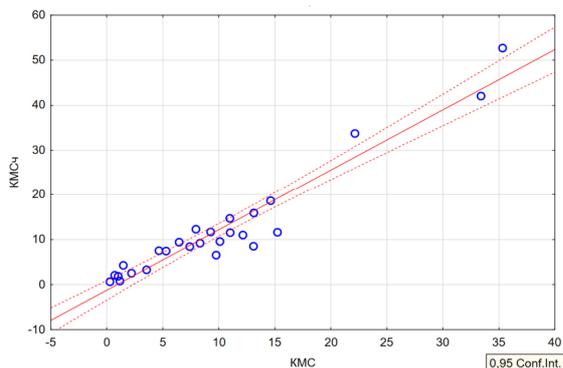


Рис. 8. Корреляционная зависимость между значениями коэффициента местного сопротивления, полученными в натурном эксперименте и при повторном численном моделировании

Проведенные натурные и численные исследования показывают высокую степень взаимосвязи, коэффициент корреляции (рис. 8) для всех экспериментов колеблется в диапазоне $r=0,95...0,98$ и коэффициент детерминации $r^2=0,89...0,96$, критерий Фишера меньше критических значений, значимость $p \ll 0,05$. Отклонение значений давлений по результатам численного и натурного эксперимента не превышает 5%.

Выводы. Статья посвящена новой конструкции узла подачи рециркуляционного воздуха. Представлены результаты численного и натурного экспериментов, условия их проведения. Анализ полученных данных позволяет сформулировать следующие выводы:

- применение функции желательности Харрингтона позволило идентифицировать оптимальные параметрические области. Установлено, что наиболее рациональные значения факторов находятся в диапазонах: $h/b = 0,75$; $R_1/R_2 = 0,7$; $V_p/V_{ж} = 16$. При данных сочетаниях параметров достигается максимальное значение коэффициента местного сопротивления, что соответствует рациональным условиям процесса;

- анализ функции желательности выявил, что фактор $V_p/V_{ж}$ оказывает наиболее существенное влияние на целевой показатель, в то время как параметры R_1/R_2 и h/b демонстрируют менее выраженное воздействие в исследуемом диапазоне. Увеличение отношения скоростей свыше 5,0 приводит к возрастанию КМС (более чем в 2 раза), что делает максимально целесообразным использование повышенных значений данного параметра, но до уровня выбивания.

- квадратичная модель регрессии с учётом эффектов взаимодействия факторов позволяет прогнозировать значения КМС в широком диапазоне параметров. Полученные уравнения могут быть использованы для оптимизации технологических режимов и проектирования систем аспирации с воздушно-рециркуляционным затвором.

На основании проведенных исследований, представленная конструкция демонстрирует высокую эффективность и пригодна для практического применения в качестве узлов подачи рециркуляционного воздуха. Дальнейшее развитие работы целесообразно направить на изучение

выявленных закономерностей в расширенном диапазоне варьирования исследуемых параметров, что позволит уточнить границы применимости полученных математических моделей и расширить область их практического использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Афанасьев И.И., Ващенко В.С. Генералов Г.С., Данченко Ф.И., Логачев И.Н., Малюта Д.И., Минко В.А., Сербин А.Н., Шумилов Р.Н., Янов А.П. Обеспыливание воздуха на фабриках горно-обогатительных комбинатов. Москва: Недра, 1972. 184 с.
2. Минко В.А. Основы промышленной вентиляции и пневмотранспорта. Москва, 1975. 140 с.
3. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions. Boca Raton: CRC Press, 2014. 417 p.
4. Huque S.T., Donecker P., Rozentals J.J., Benjamin C.W. The Transfer Chute Design Manual: For Conveyor Belt Systems. Conveyor Transfer Design Pty. Limited, 2010. 272 p.
5. Mallick S., Wypych P.W. Evaluation of scaleup procedures using "system" approach for pneumatic conveying of powders // Particulate Science and Technology. 2010. Vol. 28, No. 1. Pp. 41–50. DOI: 10.1080/02726351003663323.
6. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев К.И. Обеспыливающая вентиляция. Т. 1 / под общ. ред. В.А. Минко. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 460 с.
7. Li X., Wang Q., Liu Q., Hu Y. Developments in studies of air entrained by falling bulk materials // Powder Technology. 2016. Vol. 291. Pp. 159–169. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.12.041.
8. Fang C., Xu J., Zhao H., Li W., Liu H. Experimental investigation on particle entrainment behaviors near a nozzle in gas-particle coaxial jets // Powder Technology. 2015. Vol. 286. Pp. 55–63. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.06.003.
9. Киреев В.М., Гольцов А.Б., Минко В.А. Расчет и разработка аспирационных укрытий мест перегрузок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 114–117.
10. Овсянников Ю.Г. Разработка и исследование пылеконцентратора циклонного типа // Борьба с пылью на предприятиях по переработке сыпучих материалов: сб. науч. тр. Белгород: БТИСМ, 1990. С. 59–64.
11. Шаптала В.Г., Борзенков А.В., Подгорнев И.А. Исследование аэродинамических свойств рециркуляционных систем аспирации // Борьба с пылью на предприятиях по переработке сыпучих материалов: сб. науч. тр., Белгород: БТИСМ, 1990. С. 8.
12. Овсянников Ю.Г. Аспирационные системы с принудительной рециркуляцией: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 137 с.
13. Пат. 17723613 Российская Федерация, МПК E21F 5/00 (2006.01); B65G 21/08 (2006.01). Укрытие с рециркуляцией аспирируемого воздуха / Овсянников Ю.Г. и др.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2017112163; заявл. 10.04.2017; опубл. 14.02.2018, Бюл. № 5. 7 с.
14. Kireev V.M. The Use of Coanda Effect in Energy-Efficient Recirculating Aspiration Systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Article 032020. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032020.
15. Пат. 21746413 Российская Федерация, МПК E21F 5/00 (2006.01). Узел перегрузки с рециркуляцией аспирационного воздуха / Киреев В.М. и др.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2022130751; заявл. 25.11.2022; опубл. 03.04.2023, Бюл. № 10. 8 с.
16. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. 3rd ed. DCW Industries, 2006. 522 p.
17. Нейков О.Д., Логачев И.Н. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgia, 1981. 192 с.
18. Логачев И.Н. Аспирация перегрузок сыпучих материалов агломерационных фабрик // Местная вытяжная вентиляция: Сб. научных трудов. М.: МДНТП, 1969. С. 93–100.
19. Минко В.А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1981. 176 с.
20. Минко В.А., Кулешов М.И., Плотникова Л.В. Обеспыливание в литейных цехах машиностроительных предприятий. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.

Информация об авторах

Киреев Владимир Евгеньевич, аспирант. E-mail: vova-kireev-1997@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Уваров Валерий Анатольевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: v_a_uvarov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Киреев Виталий Михайлович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: vit31rus@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Попов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: evg.popov81@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ткач Людмила Владимировна, аспирант. E-mail: koryaka_90@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 22.01.2026 г.

© Киреев В.Е., Уваров В.А., Киреев В.М., Попов Е.Н., Ткач Л.В., 2026

***Kireev V.E., Uvarov V.A., Kireev V.M., Popov E.N., Tkach L.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: vova-kireev-1997@mail.ru*

AERODYNAMIC ASPECTS OF IMPROVING ASPIRATION WITH A RECIRCULATION VALVE

Abstract. *This article presents a new design for a recirculated air supply unit for dust removal systems in transfer stations. The proposed unit utilizes the additional Coanda effect, which was first identified with the participation of the authors and occurs when several Coanda channels are arranged in series. Using this effect, the authors propose an innovative technology aimed at improving the aerohydrodynamic efficiency and energy savings of the dust removal system. The conditions and results of both numerical and field experiments are presented. Based on the experimental data, the most efficient operating modes and geometric parameters of the unit are determined, and recommendations for its use are provided.*

The developed technology is highly versatile and has potential for industrial application, particularly in industries requiring significant volumes of pumped air and high dust generation rates, such as in the metallurgical, construction, and manufacturing sectors. The results of the article open up broad prospects for the large-scale implementation of this technology in industries with existing industrial aspiration systems, taking into account the reduced energy consumption. The material presented in the article can serve as a basis for further engineering developments and the modernization of existing aspiration systems.

Keywords: *Coanda effect, recirculation, energy efficiency, local resistance factor, aspiration systems, and transfer chutes.*

REFERENCES

1. Afanasyev I.I., Vashchenko V.S., Generalov G.S., Danchenko F.I., Logachev I.N., Maljuta D.I., Minko V.A., Serbin A.N., Shumilov R.N., Yanov A.P. *Dedusting Air at Mining and Processing Plants [Obespylivanie vozduha na fabrikah gorno-obo-gatitel'nyh kombinatov]*. Moscow: Nedra, 1972. 184 p. (rus)

2. Minko V.A. *Fundamentals of Industrial Ventilation and Pneumatic Transport [Osnovy promyshlennoj ventilyacii i pnevmotransporta]*. Moscow, 1975. 140 p. (rus)

3. Logachev I.N., Logachev K.I. *Industrial Air Quality and Ventilation: Controlling Dust Emissions*. Boca Raton: CRC Press, 2014. 417 p.

4. Huque S.T., Donecker P., Rozentals J.J., Benjamin C.W. *The Transfer Chute Design Manual: For Conveyor Belt Systems*. Conveyor Transfer Design Pty. Limited, 2010. 272 p.

5. Mallick S., Wypych P.W. *Evaluation of scaleup procedures using a "system" approach for*

pneumatic conveying of powders. *Particulate Science and Technology*. 2010. Vol. 28, No. 1. Pp. 41–50. DOI: 10.1080/02726351003663323.

6. Minko V.A., Logachev I.N., Logachev K.I. *Dedusting ventilation [Obespylivayushchaya ventilyaciya]*. Vol. 1: monograph edited by V.A. Minko. Belgorod: BSTU Publishing House, 2006. 460 p. (rus)

7. Li X., Wang Q., Liu Q., Hu Y. *Developments in studies of air entrained by falling bulk materials*. *Powder Technology*. 2016. Vol. 291. Pp. 159–169. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.12.041.

8. Fang C., Xu J., Zhao H., Li W., Liu H. *Experimental investigation on particle entrainment behaviors near a nozzle in gas–particle coaxial jets*. *Powder Technology*. 2015. Vol. 286. Pp. 55–63. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.06.003.

9. Kireev V.M., Goltsov A.B., Minko V.A. *Calculation and development of aspiration shelters for transfer points [Raschet i razrabotka aspiracionnyh ukrytij mest peregruzok]*. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2010. No. 3. Pp. 114–117. (rus)

10. Ovsyannikov Yu.G. Development and study of a cyclone-type dust concentrator [Razrabotka i issledovanie pylekonzentratora ciklonnogo tipa]. Dust control at bulk material processing plants [Bor'ba s pyl'yu na predpriyatiyah po pererabotke sypuchih materialov]: collection of scientific papers. Belgorod: BTISM, 1990. Pp. 59–64. (rus)
11. Shaptala V.G., Borzenkov A.V., Podgornev I.A. Study of aerodynamic properties of recirculation aspiration systems [Issledovanie aerodinamicheskikh svoystv recirkulyacionnyh sistem aspiracii]. Dust control at bulk materials processing plants [Bor'ba s pyl'yu na predpriyatiyah po pererabotke sypuchih materialov]: collection of scientific papers. Belgorod: BTISM, 1990. 8 p. (rus)
12. Ovsyannikov Yu.G. Aspiration systems with forced recirculation: monograph [Aspiracionnye sistemy s prinuditel'noj recirkulyaciej]. Belgorod: BSTU Publishing House, 2013. 137 p. (rus)
13. Ovsyannikov Yu.G. et al. Shelter with recirculation of aspirated air. Patent RF, no. 2017112163, 2018.
14. Kireev V.M. The Use of Coanda Effect in Energy-Efficient Recirculating Aspiration Systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Article 032020. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032020.
15. Kireev V.M. et al. Transfer unit with recirculation of aspiration air. Patent RF, no. 2022130751, 2023.
16. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. 3rd ed. DCW Industries, 2006. 522 p.
17. Neykov O.D., Logachev I.N. Air aspiration and dedusting in powder production [Aspiraciya i obespylivanie vozduha pri proizvodstve poroshkov]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Metallurgy, 1981. 192 p. (rus)
18. Logachev I.N. Aspiration of Bulk Material Handling Areas at Sintering Plants [Aspiraciya peregruzok sypuchih materialov aglomeracionnyh fabrik]. Collection of Scientific Papers "Local Exhaust Ventilation." Moscow: MDNTP, 1969. Pp. 93–100. (rus)
19. Minko V.A. Dedusting of Technological Processes in the Production of Building Materials [Obespylivanie tekhnologicheskikh processov proizvodstva stroitel'nyh materialov]. Voronezh: VSU Publishing House, 1981. 176 p. (rus)
20. Minko V.A., Kuleshov M.I., Plotnikova L.V. Dedusting in Foundries of Machine-Building Enterprises [Obespylivanie v litejnyh cekah mashinostroitel'nyh predpriyatij]. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 224 p. (rus)

Information about the authors

Kireev, Vladimir E. Postgraduate student. E-mail: vova-kireev-1997@mail.ru. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia.

Uvarov, Valery A. DSc, Professor. E-mail: v_a_uvarov@mail.ru. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia.

Kireev, Vitaly M. PhD, Associate Professor. E-mail: vit31rus@mail.ru. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia.

Popov, Evgeny N. PhD, Associate Professor. E-mail: evg.popov81@gmail.com. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia. 46 Kostyukova St.

Tkach, Lyudmila V. Postgraduate student. Email: koryaka_90@mail.ru. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia.

Received 22.01.2026

Для цитирования:

Киреев В.Е., Уваров В.А., Киреев В.М., Попов Е.Н., Ткач Л.В. Аэродинамические аспекты совершенствования аспирации с рециркуляционным затвором // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 3. С. 94–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-94-103

For citation:

Kireev V.E., Uvarov V.A., Kireev V.M., Popov E.N., Tkach L.V. Aerodynamic aspects of improving aspiration with a recirculation valve. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 3. Pp. 94–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-94-103