

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»

На правах рукописи

Крюков Илья Валерьевич

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ
ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ
ЗА СЧЕТ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ**

05.23.03 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, доцент Аверкова Ольга Александровна

Белгород – 2017

Список основных условных обозначений

Размерные величины имеют верхний значок \sim («тильда»). Усреднённые по длине величины обозначены прямой чертой над буквой или нижним индексом s ; безразмерные величины без специальных символов.

$$Bu = \frac{2Ke}{\zeta_u(1-n^2)} - \text{критерий Бутакова – Нейкова};$$

d_e - эквивалентный диаметр частиц сыпучего материала;

E - безразмерный параметр, характеризующий степень перфорации стенки желоба и к.м.с. отверстий;

$$Eu = 2 \frac{\tilde{p}_2 - \tilde{p}_1}{\tilde{v}_k^2 \tilde{\rho} \sum \zeta} - \text{число Эйлера};$$

\tilde{f}_1 - суммарная площадь неплотностей верхнего укрытия, m^2 ;

\tilde{f}_p - суммарная площадь зазора между стенками приемной камеры нижнего укрытия и груженной конвейерной лентой, m^2 ;

\tilde{F}_M - площадь миделевого сечения частицы, m^2 ;

\tilde{l} - длина желоба, м;

$n = v_n / v_k$ - отношение скоростей падения частиц сыпучего материала в начале и конце желоба;

$$Ke = \psi \beta_k \tilde{l} \frac{\tilde{F}_M}{\tilde{V}_q} - \text{параметр эжекции};$$

\tilde{p}, \tilde{p}_u - избыточное статическое давление воздуха в трубе (желобе), Па

p_1, p_2 - избыточные статические давления соответственно в верхнем (неаспирируемом) укрытии и в приемной камере нижнего (аспирируемого) укрытия;

p_w - избыточное статическое давление в отверстиях перфорации стенки трубы, Па;

\tilde{p}_ω - избыточное статическое давление в байпасной камере, Па;

$p_\omega = 2\tilde{p}_\omega / (\tilde{\rho}\tilde{v}_k^2)$ - безразмерное избыточное статическое давление в байпасной камере;

p_y - безразмерное разрежение в нижнем укрытии;

$\tilde{Q}_1 = \tilde{Q}_a - \tilde{Q}_{mn}$ - расход транзитного воздуха ($\text{м}^3/\text{с}$);

$\tilde{Q}_a = \tilde{Q}_1 + \tilde{Q}_{mn}$ - расход аспирируемого воздуха ($\text{м}^3/\text{с}$);

\tilde{Q}_{mn} - объемный расход воздуха, поступающего через неплотности укрытия;

$\tilde{Q}_R = \tilde{S}_\omega(\omega_k - \omega_n)\tilde{v}_k$ - объемный расход воздухообмена между потоком эжектируемого воздуха в желобе и потоком воздуха, рециркулируемого в байпасной камере, $\text{м}^3/\text{с}$;

\tilde{Q}_u - расход эжектируемого воздуха в загрузочной трубе ($\text{м}^3/\text{с}$);

\tilde{Q}_ω - расход восходящего течения воздуха в байпасной камере ($\text{м}^3/\text{с}$);

$r = \tilde{S}_\omega / \tilde{S}_u$;

$R_z = \tilde{Q}_\omega / \tilde{Q}_u$ - коэффициент рециркуляции;

$\tilde{S}_0 = \tilde{\Pi}\tilde{\epsilon}_0$ (м^2) - суммарная площадь перфорационных отверстий стенок желоба;

\tilde{S}_u (м^2) - площадь сечения загрузочной трубы;

\tilde{S}_ω (м^2) - площадь сечения байпасной камеры;

\tilde{u} - скорость воздуха в трубе (желобе), $\text{м}/\text{с}$;

u_k - безразмерная скорость эжектируемого воздуха в конечном сечении пористой трубы (при $x = 1$);

u_n - безразмерная скорость эжектируемого воздуха в начальном сечении пористой трубы (при $x = 0$);

\tilde{v}_n, \tilde{v}_k - скорость частиц в начале и конце трубы (желоба), $\text{м}/\text{с}$;

\tilde{w} - скорость воздуха в отверстиях перфорации стенки трубы (желоба), $\text{м}/\text{с}$;

$\tilde{x} = 0 + \tilde{\epsilon}$ - начальное сечение $N - N$ (удаленное на бесконечно малое расстояние от начала координат);

$\tilde{x} = \tilde{l} - \tilde{\epsilon}$ - конечное сечение $K - K$ (удаленное на бесконечно малое расстояние от начала координат);

\tilde{x}_m - промежуточно-экстремальное $M - M$ (сечение, удаленное на расстояние \tilde{x}_m от начала координат), в котором наблюдаются экстремальные скорости (расходы) эжектируемого и рециркулируемого воздуха;

$z = \tilde{Q}_1 / (\tilde{v}_k \tilde{S}_u)$ - отношение расхода "глобального транзитного" воздуха к максимально возможному расходу эжектируемого воздуха;

$\tilde{V}_ч$ - объём частицы, м³;

β_k - объемная концентрация частиц в конце желоба;

γ - знак разности давлений ($\tilde{p}_\omega - \tilde{p}$) или ($p_\omega - p$);

$\tilde{\varepsilon}$ - бесконечно малое расстояние;

ε_0 - степень перфорации, отношение общей площади отверстий перфорации к общей боковой поверхности трубы;

ζ_0 - коэффициент местного сопротивления (к.м.с.) отверстия перфорации;

ζ_1 - к.м.с. неплотностей верхнего укрытия;

ζ_p - к.м.с. перегородки приемной камеры;

ζ_{un} , ζ_{uk} - к.м.с. соответственно входу эжектируемого воздуха в желоб и выходу его из желоба; $\zeta_u = \zeta_{un} + \zeta_{uk}$;

$\zeta_{\omega n}$, $\zeta_{\omega k}$ - к.м.с. соответственно выходу восходящего потока воздуха из байпасной камеры и входу его в эту камеру;

$\tilde{\Pi}$ - периметр сечения желоба, м;

$\tilde{\rho}$ - плотность воздуха, кг/м³;

ψ - коэффициент лобового сопротивления частиц;

$\tilde{\omega}$ - скорость восходящего потока воздуха в байпасной камере, м/с;

ω_k - безразмерная скорость восходящего потока воздуха в байпасной камере в конечном сечении (при $x = 1$);

ω_n - безразмерная скорость восходящего потока воздуха в байпасной камере в начальном сечении (при $x = 0$).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕСТ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	14
1.1. Причины пылеобразования при перегрузках сыпучего материала.....	14
1.2. Способы локализации мест перегрузки сыпучего материала	16
1.3. Расчет объемов аспирационного воздуха при перегрузках сыпучего материала и принципы его минимизации.....	18
1.4. Аспирационные укрытия мест перегрузки сыпучего материала и способы усовершенствования их конструктивных особенностей	24
1.4.1. Увеличение аэродинамического сопротивления желоба.	26
1.4.2. Использование замкнутой циркуляции воздуха.....	32
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ	47
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КРУГЛОМ КАНАЛЕ С КОМБИНИРОВАННОЙ БАЙПАСНОЙ КАМЕРОЙ	48
2.1. Основные расчетные соотношения	48
2.2. Перегрузка сыпучего материала по трубе с непроницаемыми стенками	53
2.3. Комбинированное байпасирование.....	60
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ	71
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА НА СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ЭЖЕКТИРУЕМОГО ВОЗДУХА	73
3.1. Цель и задачи экспериментального исследования	73
3.2. Исследование процесса рециркуляции воздуха в полости между круглой трубой и соосно-расположенной круглой байпасной камерой	74
3.2.1. Натурный эксперимент	74
3.2.2. Вычислительный эксперимент	77
3.3. Выявление оптимального соотношения размеров байпасной камеры и загрузочного канала	82
3.3.1. Натурный эксперимент	82

3.3.2. Вычислительный эксперимент	88
3.4. Исследование рециркуляции при перетекании воздуха через отверстия перфорации загрузочной трубы.....	94
3.5. Исследование рециркуляции воздушных течений при комбинированном байпасировании	99
3.6. Исследование рециркуляции воздуха в цилиндрической байпасной камере при перегрузке сыпучего материала	102
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ	106
4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОБЪЕМА ЭЖЕКТИРУЕМОГО ВОЗДУХА И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ	108
4.1. Методика расчета объемов воздуха, удаляемого из аспирационного укрытия.....	108
4.2. Общие рекомендации по проектированию аспирационной системы	113
4.3. Методика расчета объемов аспирации перегрузок сыпучего материала на телескопических станциях	115
4.3.1. Методика расчета расхода эжектируемого воздуха в перфорированных трубах телескопических погрузчиков.....	117
4.3.2. Структура программы расчета объемов аспирации телескопического погрузчика	129
4.3.3. Изменение аэродинамических параметров эжектирования воздуха в телескопических погрузчиках	132
ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЯ	157
Приложение А – Программа расчета объемов аспирации при байпасировании телескопической трубы	157
Приложение Б – Копии документов о внедрении результатов диссертационного исследования.....	162

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы. Перегрузки сыпучих материалов в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства сопровождаются значительными пылевыведениями. Наиболее надёжным способом улавливания пылевых образований при перегрузке сыпучих материалов является применение местной вытяжной вентиляции. Местные вентиляционные отсосы закрытого типа – аспирационные укрытия исключают попадание загрязняющих веществ, в частности пыли, в производственные помещения и снижают загрязнение окружающей среды. При высокой степени эффективности аспирационных укрытий остро стоит задача снижения их энергоёмкости. Существующие способы решения данной задачи разделяются на два направления: снижение расхода воздуха, поступающего через неплотности и снижение объёма воздуха, эжектируемого потоком сыпучего материала. Минимизацию объёма эжектируемого воздуха осуществляют путём снижения скорости падения потока сыпучего материала; увеличения аэродинамического сопротивления при движении эжектируемого воздуха; организации циркуляции воздушной среды – рециркуляции. Рециркуляция за счет потерь энергии при движении воздушной среды по обводным (байпасным) каналам существенно снижает расход эжектируемого воздуха, поступающего в аспирационное укрытие и, как следствие, позволяет снизить расход воздуха, удаляемого из укрытия. Таким образом, теоретическое и экспериментальное исследование явления рециркуляции и способов ее организации, является актуальной задачей, направленной на разработку эффективных систем обеспыливающей вентиляции сниженной энергоёмкости.

Данное направление исследований поддержано грантами, по которым оно разрабатывалось: Президента РФ НШ–588.2012.8 «Разработка методов пыле- и газоулавливания в пыльных цехах промышленных предприятий» (2012 - 2013); РФФИ № 12-08-97500-р_центр_a «Разработка методов и алгоритмов компьютерного моделирования, численное и экспериментальное исследование

отрывных течений в энергосберегающих системах улавливания загрязняющих веществ» (2012 - 2014); программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова по проекту № А-10/12 «Разработка энергосберегающих систем локализации пылегазовых выделений при производстве строительных материалов» (2012 - 2015); Президента РФ МК-103.2014.1 «Разработка методов и алгоритмов математического моделирования, численное и экспериментальное исследование двухфазных потоков в системах аспирации» (2014 - 2015); РФФИ № 14-41-08005 р_офи_м «Математическое моделирование процессов аспирации и разработка научных основ создания энергоэффективных систем локализации пылегазовых выделений» (2014-2016).

Степень разработанности темы исследования. Проблемам обеспыливающей вентиляции и их совершенствованию, численному и аналитическому исследованию вентиляционных течений посвящены труды Азарова В.Н, Беспалова В.И., Богуславского Е.И., Боровкова Д.П., Бутакова С.Е., Вальдберга А.Ю., Голованчикова А.Б., Гольшева А.М., Гримитлина А.М., Гримитлина М.И., Дацюк Т.А., Журавлева В.П., Зиганшина А.М., Зиганшина М.Г., Красовицкого Ю.В., Ливчак И.Ф., Логачева И.Н., Нейкова О.Д., Мензелинцевой Н.В., Минко В.А., Панова С.Ю., Позина Г.М., Посохина В.Н., Страховой Н.А., Талиева В.Н., Таурит В.Р., Уляшевой В.М., Хоперскова А.В., Шапталы В.В., Шапталы В.Г., Шепелева И.А., Штокмана Е.А., А.А., Anderson D.M., Nath T., Nemeon W.C.L., Jones M.G., Bianconi W.O.A., Wyruch P.W., Xiaochuan Li и многих других.

В частности, разработкой систем рециркуляции для снижения расхода эжектируемого воздуха посвящены труды Аверковой О.А., Гольшева А.М., Логачева И.Н., Минко В.А., Овсянникова Ю.Г. Было рассмотрено явление рециркуляции воздушных течений за счет устройства обводных каналов и за счет использования перфорированного загрузочного канала. Исследования комбинированной рециркуляции воздушных течений за счет перетекания воздуха из загрузочного канала в байпасную камеру и обратно через перфорационные

отверстия загрузочной трубы и её торцы не производилось, ни теоретически, ни экспериментально.

Цель исследования заключается в теоретическом и экспериментальном выявлении закономерностей рециркуляционного воздушного потока, организованного в системе «загрузочный канал – байпасная камера», аэродинамически связанных торцевыми открытыми проёмами и перфорационными отверстиями загрузочного канала, способствующих повышению эффективности систем вентиляции при перегрузках сыпучих материалов.

Задачи исследования:

- на основе дифференциальных уравнений эжектируемого воздуха в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала, и рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере, разработать математическую модель комбинированной рециркуляции воздушных течений через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры;
- определить параметры, обеспечивающие снижение объёмов эжекции за счет организации рециркуляционных течений воздуха;
- экспериментально выявить влияние рециркуляции на расход воздуха, необходимого для удаления из аспирационного укрытия; определить оптимальное отношение диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочного канала; найти влияние перфорационных отверстий загрузочного канала, места их нанесения, на снижение необходимого объёма аспирации; оценить эффект комбинированно организованной рециркуляции на объем эжектируемого воздуха;
- разработать методику расчёта расходов эжектируемого, рециркулируемого и аспирируемого воздушных потоков при локализации пылевых выбросов при перегрузке сыпучего материала;
- разработать конструкции аспирационных укрытий сниженной энергоёмкости, эффективно локализирующих пылевыведения при перегрузках сыпучих материалов.

Объект исследования – местное вентиляционное устройство закрытого типа при обеспыливании процесса перегрузки сыпучего материала.

Предмет исследования – процессы рециркуляции воздушных потоков при комбинированном байпасировании.

Научная новизна исследования состоит в следующем.

1. Разработана математическая модель комбинированной рециркуляции воздушных течений через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры, на основе дифференциальных уравнений эжектируемого воздуха в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала, и рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере.

2. В результате численных расчетов доказано, что расход эжектируемого воздуха существенно снижается за счет организации рециркуляционных воздушных течений.

3. Экспериментальным путём выявлено, что при снабжении загрузочного канала аспирационного укрытия байпасной камерой, где перетекание воздуха осуществляется на их торцах, возникает рециркуляция воздуха, способствующая снижению расхода эжектируемого воздуха. Оптимальным отношением диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы является величина равная 2-2,5.

4. Выявлено, что перфорирование загрузочной трубы при комбинированном использовании торцевого перетекания и перфорации приводит к снижению расхода аспирируемого воздуха только в случае, когда перфорация находится в области разрежения. Установлено, что использование торцевого перетекания воздуха между байпасной камерой и загрузочным каналом позволяет снизить в системе вентиляции расход аспирируемого воздуха до 69%, а при комбинированном использовании торцевого перетекания и перфорации - до 84%.

5. Разработана методика расчета расходов эжектируемого, рециркулируемого и аспирируемого воздушных потоков при перегрузке сыпучего материала на телескопических станциях.

Методологической основой работы является динамическая теория эжекции воздуха потоком сыпучего материала. В ходе диссертационного исследования

использовались вычислительный и натурный эксперимент; методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, метод граничных интегральных уравнений.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно п.1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии», п.3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

Теоретическая значимость работы состоит в разработке математической модели динамики эжектируемого и рециркулируемого воздушных потоков в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала и комбинированной рециркуляции воздуха через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в:

- разработке способа снижения производительности местных вентиляционных отсосов закрытого типа, необходимой для эффективного улавливания выбросов загрязняющих веществ;
- разработке конструкции аспирационных укрытий перегрузок сыпучих материалов;
- разработке инженерной методики расчёта необходимого расхода аспирируемого воздуха при перегрузке сыпучего материала на телескопических станциях.

Результаты исследования нашли применение при проектировании и модернизации систем вентиляции в ООО «Брянская мясная компания» (производство комбикормов); в ООО "Институт «БелАгроПроект+» и в учебном

процессе магистрантов по направлению «Строительство» в БГТУ им. В.Г. Шухова.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель комбинированной рециркуляции воздушных течений через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры;
- результаты численных расчетов, доказывающих снижение расхода эжектируемого воздуха за счет организации рециркуляционных воздушных течений;
- результаты натурных экспериментов по выявлению влияния рециркуляции воздушных потоков, организованных путём организации торцевого перетекания между загрузочным каналом и байпасной камерой на снижение расхода эжектируемого воздуха, а также по определению оптимального отношения диаметров байпасного и загрузочного каналов;
- выявленные путём проведения натурального эксперимента закономерности снижения расходов эжектируемого и аспирируемого воздуха за счет комбинированного байпасирования – организации рециркуляции воздушных течений за счет перетекания воздуха через торцы байпасного канала и отверстий перфорации его боковой поверхности;
- методика расчета расходов эжектируемого, рециркулируемого и аспирируемого воздушных потоков при перегрузке сыпучего материала на телескопических станциях.

Достоверность результатов. Степень достоверности результатов обоснована использованием фундаментальных методов аэродинамики и математики, подтверждается удовлетворительным согласованием результатов аналитических, численных расчетов и результатов натурных экспериментов.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались на Региональной научно-технической конференции по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных

исследований и Правительством Белгородской области (г. Белгород, 2015, 2016 гг.), Международной научно-практической конференции: «Современные концепции научных исследований» (г. Москва, 2014 г.), Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (г. Екатеринбург, 2016 г.), научно-методических семинарах кафедр «Теплогазоснабжение и вентиляции» СПбГАСУ и БГТУ им. В.Г. Шухова.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 научных работ, из которых 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 2 статьи проиндексированы в WoS и Scopus, 2 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 163 страницы, в том числе 50 рисунков, 11 таблиц, список используемой литературы из 131 наименований и 2 приложения.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕСТ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Причины пылеобразования при перегрузках сыпучего материала

На предприятиях металлургической, химической, горнодобывающей промышленности, сельского хозяйства, при производстве строительных материалов одним из основных факторов выделения огромного количества пыли являются технологические процессы, связанные с переработкой и перегрузкой сыпучего материала. К таким процессам относятся грохочение, дробление, конвейерные перегрузки сыпучего материала по закрытым каналам (желобам), загрузка технологического оборудования. Данные источники пылевыведения оказывают значительное влияние на запыленность воздуха в рабочей зоне [1-4].

Выделение пыли происходит в следующих случаях.

1. Вследствие перераспределения давлений за счет аэродинамического взаимодействия твердых частиц перегружаемого материала, движущихся под действием гравитационных сил, и газообразной среды (эжекция воздуха). При движении материала по закрытому загрузочному желобу в негерметичную полость укрытия, образуется поток так называемого эжектируемого воздуха, под действием которого происходит выбивание пыли через неплотности укрытия.

2. Под действием технологического оборудования, чьи исполнительные органы имеют большую скорость движения (дезинтеграторы, молотковые и валковые дробилки). В результате этого формируются направленные воздушные потоки.

3. При загрузке материалом закрытых полостей, таких как бункеры или силосы. Высокие показатели давления, обычно, возникают, когда материалом сразу заполняют весь объем закрытой полости.

4. В результате теплообмена между газообразной средой в полости оборудования и окружающего воздуха. Такой способ пылеобразования возможен при перегрузках и транспортировке горячего материала.

К основным источникам пылеобразования можно отнести дробильно-помольные операции, работу технологических агрегатов (например, питатели, грохоты), транспортирование и перегрузку с конвейера на конвейер сыпучих материалов, загрузку материалом закрытых емкостей и силосов.

Наиболее интенсивными источниками образования пыли из выше перечисленных считаются узлы перегрузки сыпучего материала с конвейера на конвейер, с технологического оборудования на конвейер и т.д. [5-7]. Ленточные конвейеры считаются на сегодняшний день самым распространенным типом транспортирующих машин, которые применяются во всех областях промышленности. В нашей стране на их долю приходится около 90% от всего используемого оборудования [8]. Для узлов перегрузки объемы аспирации составляют примерно 1500...4000 м³/ч. Доля таких источников пылеобразования доходит до 70 % от общего их количества [9, 2].

Попадание пыли в рабочую зону помещения нежелательно и должно быть, по возможности, полностью исключено, т.к. может привести к возникновению профессиональных заболеваний у рабочих. Уровень запыленности воздуха рабочей зоны не должен превышать требуемого уровня предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ, установленного для данного предприятия [10].

Пыль, витающая в рабочей зоне помещения, чаще всего имеет размер до 20 мкм. Крупные частицы пыли имеют размер более 10 мкм и при вдыхании их задерживаются слизистой оболочкой, а мелкие частицы, чей диаметр не превышает 5 мкм, вдыхаются и выдыхаются без оседания на слизистых. Наиболее вредной является пыль диаметром 5-10 мкм, т.к. такая пыль, попадая в легкие, может задерживаться в них, что оказывает вред для человека и может привести к развитию профессиональных заболеваний.

Среди специфических профессиональных пылевых заболеваний наиболее часто встречаются пневмокониозы [11].

Согласно исследованиям [11, 12], пыль, содержащая двуокись кремния, является опасной для здоровья человека и может привести к развитию силикоза. Это связано с тем, что данная пыль обладает так называемыми фиброгенными свойствами. Наиболее часто силикозы развиваются у рабочих, работающих в отраслях горнорудной, машиностроительной, металлургической промышленности, при производстве огнеупорных и керамических материалов, при переработке пород, содержащих свободную двуокись кремния. Надежными методами для борьбы с пылью в рабочей зоне помещения являются технические меры, предотвращающие и исключают ее попадание в зону дыхания человека, путем локализации места пылеобразования.

1.2. Способы локализации мест перегрузки сыпучего материала

Наиболее эффективным и экономичным способом локализации мест пылевыделения является применение местной обеспыливающей вентиляции, а именно местных вентиляционных отсосов закрытого типа – аспирационных укрытий [2, 3, 17, 12].

Требования, предъявляемые к аспирационным укрытиям по санитарно-гигиеническим соображениям, широко освещены в литературе [1, 13, 14] и нормативных документах [15, 16]. Помимо санитарно-гигиенических требований, направленных на поддержание концентрации пыли ниже уровня ПДК в воздухе рабочей зоны к аспирационным укрытиям предъявляются и другие требования [1, 2, 17, 18].

1. Технологические – эффективность применения укрытия при определенных технологических условиях.

2. Экологические – минимизация пылевой нагрузки на пылеулавливающее оборудование аспирационной системы и, как следствие, снижение концентрации пыли выбрасываемой в атмосферу.

3. Экономические – уменьшение количества аспирируемого воздуха, а, следовательно, и снижение мощности вентилятора, и общей материалоемкости системы аспирации.

К технологическим требованиям относят способность укрытия локализовать источник пылевых выделений, не препятствуя технологическому процессу. Санитарно-гигиенические, экологические и экономические требования тесно связаны между собой и зависят друг от друга.

Существуют и другие методы борьбы с пылевых выделениями, возникающими в рабочей зоне, например, такие как гидрообеспыливание и пеноподавление [19]. При гидрообеспыливании материал увлажняется, а при пеноподавлении – покрывается слоем пены.

Однако эти способы могут выступить только как вспомогательные для борьбы с пылеобразованием, поскольку они не решают проблему пылеобразования, а в ряде случаев невозможны по технологическим причинам.

На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема системы аспирации перегрузочного узла.

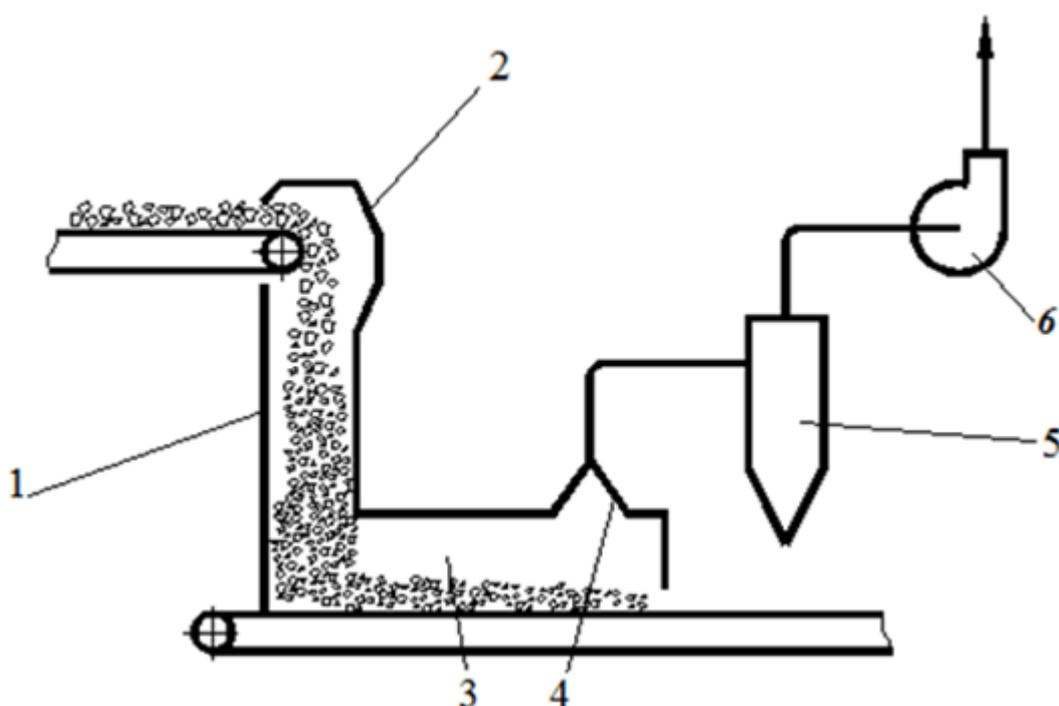


Рисунок 1.1 – Классическая схема аспирационной системы перегрузочного узла: 1 - желоб, 2 - верхнее укрытие, 3 - нижнее укрытие, 4 - аспирационная воронка, 5 - пылеуловитель, 6 - вентилятор.

Использование систем аспирации для борьбы с пылеобразованием требует значительных энергозатрат [20-23] (до 20% мощности оборудования предприятия), поэтому в последние годы достаточно актуальной стала проблема оптимизации локализирующих устройств и снижение их энергоемкости с целью повышения экономичности. Связано это в первую очередь с возрастанием мощности производственного оборудования, увеличением количества конвейерных перегрузочных узлов, стоимости электроэнергии. Энергоемкость аспирационной системы обуславливается мощностью потребляемой вентилятором или дымососом, зависящей от объема перемещаемого воздуха по воздуховодам системы и их гидравлического сопротивления и определяется по следующей формуле:

$$N = \frac{Q_a \Delta P_c}{1000 \eta_v \eta_n} \quad (1.1)$$

где Q_a – объем аспирации, м³/с; ΔP_c – сопротивление главной магистрали системы аспирации (воздуховодов, выбросной трубы, пылеуловителей), Па; η_v , η_n – к.п.д. вентилятора и передачи.

1.3. Расчет расходов аспирационного воздуха при перегрузках сыпучего материала и принципы его минимизации

Необходимый массовый расход воздуха из аспирационного укрытия определяют из выражения [24]:

$$G_a = G_{жс} + G_n, \quad (1.2)$$

где $G_{жс}$ – массовый расход воздуха, поступающий по желобу в укрытие под действием эжектирующих свойств сыпучего материала; G_n – массовый расход воздуха, подсасываемый в укрытие через несанкционированные проемы или неплотности.

Массовый расход воздушного потока, поступающего в местные вентиляционные отсосы закрытого типа через неплотности

$$G_n = F_n \sqrt{\frac{2P_y \rho}{\zeta_n}}, \quad (1.3)$$

где P_y – разрежение, поддерживаемое в укрытии, Па; F_n – площадь неплотностей, м²; ρ – плотность воздуха, кг/м³; ζ_n - к.м.с. неплотностей.

Из формулы (1.3) следует, что расход воздуха, поступающий через неплотности, зависит от их площади и разрежения в укрытии, создаваемого вентилятором. Количество подсасываемого в укрытие воздуха составляет более 30% от общего объема удаляемого из укрытия воздуха [24]. Следовательно, уменьшая площадь неплотностей F_n при заданном разрежении P_y можно снизить количество подсасываемого в укрытие воздуха.

Данные величины в практике проектирования нормируются в зависимости от конструкции укрытия, вида технологического оборудования и перегружаемого материала. Однако, полностью устранить подсос воздуха в укрытие, невозможно, но разработанные аспирационные укрытия, устройства и методики, позволяют свести их к минимуму [5, 25-30].

На практике основной составляющей необходимого расхода аспирируемого воздуха является величина $G_{жс}$. Механизм перетекания воздуха по загрузочному желобу более сложен, чем движение подсасываемого через отверстия неплотностей воздуха.

В работах И.Н. Логачева и О.Д. Нейкова [1, 18, 31-34], В.А. Минко [2, 3, 35-37] перемещение воздуха по желобу под действием потока падающего сыпучего материала рассматривается как процесс перемещения воздуха в желобах, имеющих определенную гидравлическую характеристику, под влиянием перепада давления. При перегрузках не нагретых материалов величину объемов эжекции воздуха можно выразить по формуле

$$Q_{жс} = F \sqrt{\frac{P_э \pm P_{об} + \Delta P_y}{0,5 \rho \Sigma \zeta}} \quad (1.4)$$

где F – площадь сечения канала, м²; $P_э$ – эжекционное давление, Па; $P_{об}$ –

давление, развиваемое оборудованием, Па; ΔP_y – разность давлений, вследствие действия местного отсоса (разрежение в полости укрытия P_y), Па; $\sum \zeta$ – сумма к.м.с. желоба и укрытий; ρ – плотность воздуха в желобе, кг/м³.

Избыточное давление P_3 , создаваемое эжектируемым воздухом, зависит от ряда параметров: гранулометрического состава материала, объемной концентрации материала, плотности материала и его массового расхода, коэффициента лобового сопротивления частиц, высоты падения материала, угла наклона загрузочного желоба, площади поперечного сечения загрузочного желоба. Некоторые из этих параметров являются неуправляемыми или малоуправляемыми в условиях производства.

При проектировании систем аспирации широкое использование получил коэффициент эжекции $\varphi = u_2/v_k$, где u_2 – средняя скорость эжектируемого воздуха в загрузочном желобе, м/с; v_k – скорость падения материала при выходе из желоба, м/с. Массовый расход можно определить следующим образом

$$G_{жс} = \varphi v_k F_{жс} \rho \quad (1.5)$$

где $F_{жс}$ – площадь поперечного сечения желоба, м²; ρ – плотность воздуха в желобе, кг/м³.

В случае равноускоренного движения потока сыпучего материала по желобу коэффициент эжекции вычисляется из критериального уравнения

$$\varphi|\varphi| = Eu + \frac{Bu}{3} \left[|1 - \varphi|^3 - |n - \varphi|^3 \right], \quad (1.6)$$

где Bu – число Бутакова-Нейкова, которое характеризует величину эжекционного давления равноускоренным потоком частиц материала со средним эквивалентным диаметром d_3 (м);

$$Bu = \frac{1,5\psi G_M v_k}{d_3 \rho_M F_{жс} g \sum \zeta}, \quad (1.7)$$

ψ – коэффициент лобового сопротивления частиц, который является функцией $\psi = f(G_M, v_k, d_3)$; G_M – расход сыпучего материала, кг/с; ρ_M – плотность частиц

материала, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; $\sum \zeta$ – сумма к.м.с. желоба; Eu – число Эйлера, которое показывает влияние разрежений в укрытиях на расход эжектируемого воздуха:

$$Eu = 2 \frac{P_2 - P_1}{v_k^2 \rho \sum \zeta} \quad (1.8)$$

В работах [24, 38, 128] рассмотрены способы снижения количества аспирируемого воздуха для случая классической перегрузки материала с одного конвейера (верхнего) на другой (нижний). Составляется воздушный баланс для аспирируемых укрытий: укрытия приводного барабана верхнего конвейера и укрытия места перегрузки нижнего конвейера (рисунок 1.2). В результате взаимодействия аэродинамических сил падающих частиц материала и воздуха образуется направленный поток эжектируемого воздуха. Движение эжектируемого воздуха осуществляется по схеме прямотока (сверху вниз) и массовый расход в этом случае составляет $G_{ж}$ (кг/с). Местные отсосы верхнего и нижнего укрытий за счет работы вентиляторов удаляют из полости укрытий воздух в количестве G_{a1} (кг/с) и G_{a2} (кг/с), при этом за счет отсоса воздуха в полости укрытий поддерживаются нормируемые разрежения P_1 (Па) и P_2 (Па).

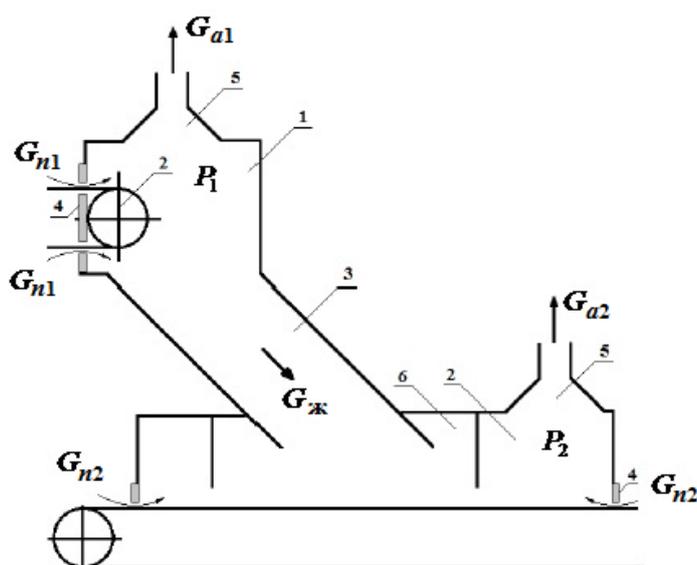


Рисунок 1.2 – Схема воздушного баланса аспирируемых укрытий перегрузки сыпучего материала: 1 - верхнее укрытие приводного барабана; 2 - нижнее укрытие места загрузки конвейера; 3 - желоб; 4 - герметизирующие уплотнения; 5 - аспирирующие патрубки; 6 - приемная камера нижнего укрытия

Под действием разрежения происходит подсос воздуха через неплотности укрытий в количестве $G_{н1}$ (кг/с) для верхнего и $G_{н2}$ (кг/с) для нижнего.

При такой схеме движения воздуха, с учетом закона сохранения массы (предполагается отсутствие межкомпонентного массообмена), справедливы следующие равенства:

$$G_{a1} = G_{н1} - G_{жс}, \quad G_{a2} = G_{н2} + G_{жс}, \quad (1.9)$$

откуда следует выражение

$$G_{a1} + G_{a2} = G_{н1} + G_{н2}. \quad (1.10)$$

Таким образом, суммарный расход воздуха, удаляемого из укрытий равен сумме расходов воздуха, подсасываемого в них через неплотности.

Данный факт показывает влияние герметизации аспирационных укрытий на минимизацию объемов отсасываемого воздуха. Помимо этого, в силу равенства (1.2), возможно $G_{a1} < 0$, если расход эжектируемого воздуха будет больше расхода воздуха, подсасываемого, через неплотности верхнего укрытия при нормируемом разрежении в укрытии $P_1 (G_{жс} > G_{н1})$. В этом случае наличие местного отсоса у верхнего укрытия не предусматривается, т.к. разрежение в этом укрытии будет выше нормируемого, вследствие перетекания воздуха в нижнее укрытие посредством эжекции. Путем анализа решений уравнений воздушного баланса можно найти требуемые объемы отсасываемого воздуха, а также расчетным путем выбрать рациональные схемы размещения аспирационных патрубков.

Исследованию минимизации объемов воздуха, поступающего через неплотности G_n , посвящена работа авторов [24], чьи предпосылки позволяют существенно снизить его количество. Несмотря на это, полностью исключить подсос воздуха в укрытие невозможно.

На практике при расчете систем аспирации значительную часть объемов удаляемого из укрытия места выгрузки или перегрузки материала воздуха составляет объем эжектируемого воздуха $G_{жс}$.

Снижение количества эжектируемого воздуха $G_{жс}$, согласно проведенному

поиску и анализу патентов [39-56, 58-62, 66-75, 103, 104, 106] и научно-технической литературы [5, 6, 63, 64], можно осуществлять в следующих направлениях:

- уменьшение скорости падения сыпучего материала, что приводит к понижению сил межкомпонентного взаимодействия;

- увеличение гидравлического сопротивления по ходу движения эжектируемого воздуха к вытяжному патрубку - это приводит к снижению чисел Eu и Eu и, в конечном итоге, уменьшает значение коэффициента эжекции φ ;

- организация замкнутой циркуляции воздуха за счет устройства байпасных камер, которые снижают количество эжектируемого воздуха, поступающего в вытяжной патрубок.

На рисунке 1.3 изображена схема классификации способов и средств минимизации объемов эжектируемого воздуха, поступающих в нижнее укрытие, которая была приведена в диссертации [128] и монографии [24].

Снижение скорости падения материала, можно осуществить путем использования наклонных желобов (схема 1) за счет возрастания силы трения частиц материала о днище желоба, а также это позволит значительно снизить пыление падающего материала [128]. Исследования, проведенные в работе [65] показали, что изменение угла наклона желоба с 90° до 45° могут снизить количество взвешенной в воздухе укрытия пыли почти в 10 раз. Также для снижения скорости падения можно использовать различного рода подвесные гирлянды из цепей или карманы (схема 2), мигалки (схема 4) или желоба с изломами и винтовыми спусками (схема 3). Рассмотренные устройства позволяют не только снизить скорость падающего материала, но также увеличивают аэродинамическое сопротивление желоба, оказывающее сопротивление эжектируемому воздуху.

Устройства, герметизирующие укрытие приводного барабана (схема 5), увеличивают сумму $k.m.c$ и, следовательно, снижаются значения чисел Эйлера и Бутакова-Нейкова, что позволяет увеличить сопротивление воздуху (ζ),

входящему через оставшиеся неплотности (f_n) в силу соотношения

$$\zeta = 2,4 \left(\frac{F_{жс}}{f_n} \right)^2. \quad (1.11)$$

Рециркуляцию воздуха можно осуществить с помощью использования байпасных камер (схема 7) или камер в бункерообразных желобах с естественной рециркуляцией (схема 8). Это обеспечит снижение количества эжектируемого воздуха, поступающего в укрытие.

Далее рассматриваются способы и средства снижения объемов эжектируемого воздуха $G_{жс}$.

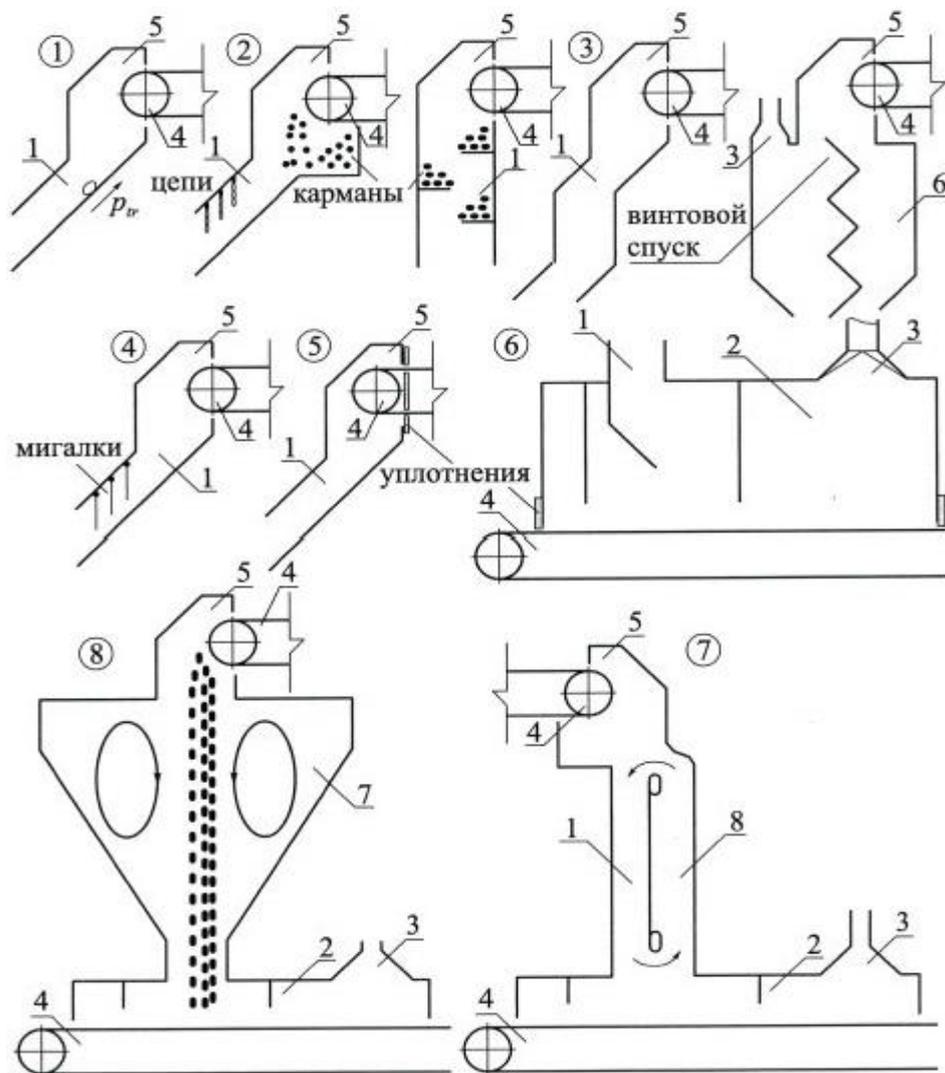


Рисунок 1.3 – Схемы снижения эжекции воздуха для нижнего аспирируемого укрытия: 1 - желоба, 2- аспириционные укрытия; 3 - местные отсосы; 4 - конвейеры, 5 - укрытие приводного барабана верхнего укрытия, 6 - бункер, 7 - бункерообразный желоб.\

1.4. Аспирационные укрытия мест перегрузки сыпучего материала и способы усовершенствования их конструктивных особенностей

Аспирационные укрытия разделяют на укрытия с одинарными и двойными стенками (в них создаётся устойчивая зона разрежения), укрытия с пылеосадительными элементами [66-71], которые способствуют снижению концентрации пыли при входе в аспирационную воронку и снижают пылевую нагрузку на пылеочистное оборудование, укрытия с различного рода вертикальными и горизонтальными перегородками [2, 72-75], оказывающими сопротивление эжекционному давлению и снижающие унос взвешенных частиц в аспирационную систему, укрытия с желобами различной конструкции, укрытия с рециркуляционными каналами.

Проведя анализ направлений в эксплуатации и разработке методов обеспыливания средствами систем аспирации, можно выделить несколько из них:

- снижение концентрации пыли в удаляемом из укрытия воздухе [65, 78, 79];
- снижение количества воздуха, отсасываемого из укрытия [77, 79, 80];
- эффективная очистка от пыли отсасываемого воздуха [1, 81-85].

Некоторые из укрытий, не смотря на заявленную эффективность в решении определенной задачи, не решают главную проблему, возникающую при перегрузках материала - избыточное давление, образующееся в укрытии в результате эжекции воздуха. Из-за этого происходит увеличение концентрации пыли в удаляемом воздухе, что приводит к выбросу ценного материала в атмосферу, увеличению количества удаляемого воздуха, что повышает производительность вентилятора, а следовательно увеличиваются затраты на электроэнергию, выбиванию запыленного воздуха в рабочую зону помещения.

Для решения проблемы связанной с эжекцией воздуха рассмотрим более подробно некоторые виды укрытий, чьи конструктивные особенности желобов позволяют снизить количество эжектируемого воздуха.

1.4.1. Увеличение аэродинамического сопротивления желоба

Исследования [1, 2, 12, 17, 32, 57, 86-102] показали, что снизить объемы воздуха, поступающего по желобу в укрытие, можно путем увеличения аэродинамического сопротивления желоба.

Наиболее традиционным способом увеличения аэродинамического сопротивления желоба является использование резиновых фартуков, установленных непосредственно в сечении желоба [39]. Предлагаются и другие способы и средства помимо известных, конструктивное решение которых повышает эффективность устройства в целом. Одним из таких способов является усовершенствованный жесткий клапан [40], установленный в загрузочном желобе (рисунок 1.4). Устройство содержит загрузочный желоб 1 с дном 2, цельную шторку 3 и шторку из отдельных элементов 4. Цельная шторка 3 подвешена в загрузочном желобе 1 при помощи шарнира 5. Шторка из отдельных элементов 4 закреплена шарниром 6 в нижнем конце цельной шторки 3. При перегрузке поток сыпучего материала отклоняет цельную шторку 3, образуя между ней и дном 2 загрузочного желоба 1 щель, через которую сыпучий материал продолжает свое движение в полость укрытия. При наличии в потоке сыпучего материала крупных кусков, возможно образование щелей для подсоса воздуха из атмосферы в полость укрытия, т.к. крупный кусок материала поднимает цельную шторку 3 выше основного потока материала. Чтобы этого не произошло, цельная шторка 3 имеет в нижней части шарнирно-закрепленную шторку из отдельных элементов 4, отклоняя которую крупный кусок материала попадает в укрытие, не образуя щелей для подсоса воздуха.

Значительно сократить количество эжектируемого воздуха можно путем использования грузовых затворов, установленных в желобе. Их применение позволяет снизить объем эжекции почти до нулевых значений. Однако, применение грузовых затворов не исключает вероятности зависания материала в полости желоба, что может привести к его забиванию и, как следствие, аварийной ситуации.

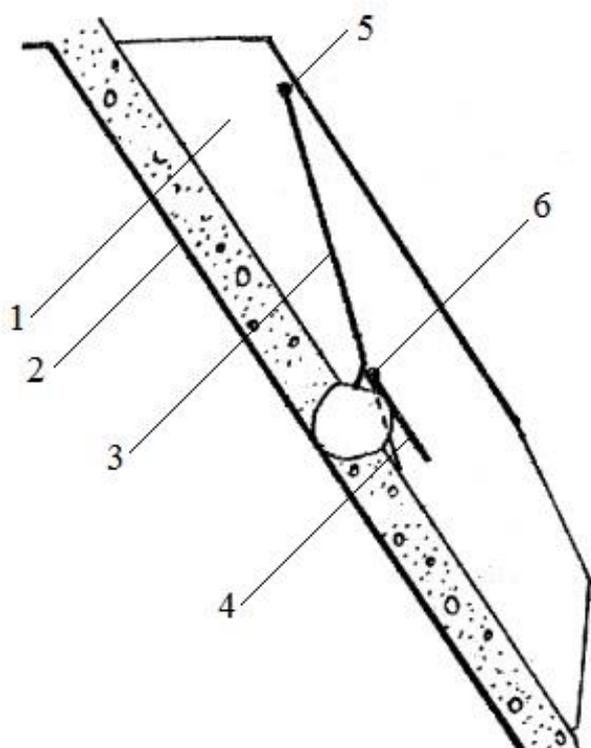


Рисунок 1.4 – Загрузочный желоб со шторкой

Данный недостаток в значительной мере устранен в конструкции загрузочного желоба с пересыпной полостью (рисунок 1.5) [41]. Перегружаемый сыпучий материал с загрузочного конвейера 1, попадает в рабочую полость 2, которая образована запорным органом 3, закрепленным шарнирно на оси 4, наклонной перегородкой 5 и корпусом 6 загрузочного желоба. Запорный орган 3 в районе оси 4 жестко соединен с рычагом 7, имеющим на конце грузы 8, которые удерживают его от отклонения. Когда определенное количество материала заполняет рабочую полость, оно создает давление на запорный орган 3 и тот под действием этого давления отклоняется, поворачиваясь вокруг оси 4 и образуя щель, через которую материал равномерно высыпается на конвейер 9. Запорный орган 3 под действием на ось 4 кулачка 10 совершает возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости со встряхиванием в верхнем положении. Если изменять положение грузов 8 по длине рычага 7, то можно добиться постоянного равномерного высыпания материала с минимальной высоты, что обеспечит минимальное пылеобразование.

Если произойдет зависание в насыпной щели крупных кусков материала, рабочая полость переполнится, и материал через щель между осью 4 и загрузочным конвейером 1 попадет в пересыпную полость и в дальнейшем на конвейер 9. В этом случае пылевыведения значительны, что служит сигналом для принудительного открывания запорного органа 3.

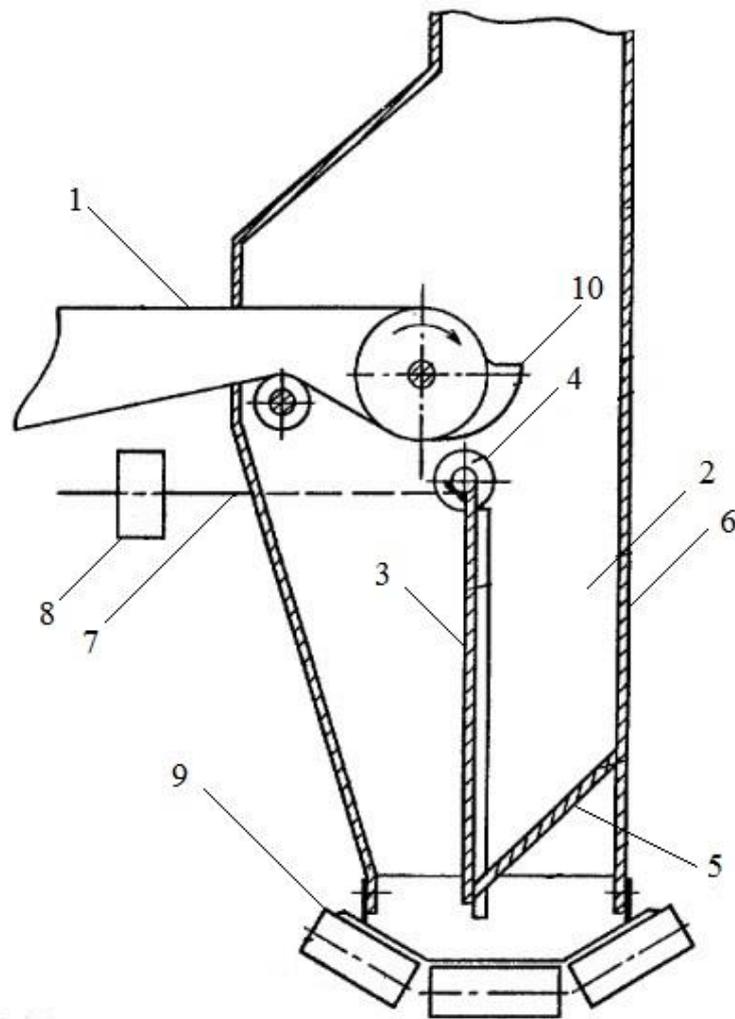


Рисунок 1.5 – Желоб с перегружаемой полостью

Еще одним примером использования подобного механизма является способ подачи сыпучего материала в аспирационное укрытие [42] (рисунок 1.6). Аспирационное укрытие состоит из корпуса 1, загрузочного желоба 2, заслонки 3, аспирационного патрубка 4, уплотняющих фартуков 5, пылесадителя 6. Заслонка выполнена в виде подвижной наклонной стенки, установленной внутри загрузочного желоба, которая соединена посредством шарнира 7 с механизмом

перемещения 9, настраиваемого с помощью гайки 10. Вентилятор 11 сообщен с аспирационным патрубком 4, а подающий конвейер 12 через загрузочный желоб 2 – с приемным конвейером 13. При выгрузке материала с конвейера 12 в загрузочный желоб 2 он наполняется и на заслонку 3 действует сила, сжимающая механизм перемещения 9, отодвигает заслонку 3, образуя щель сечением F_{on} между стенкой желоба 2 и заслонкой 3. Через эту щель материал транспортируется по загрузочному желобу 2 вместе с эжектируемым воздухом в корпус 1 и выгружается на приемный конвейер 13. Оптимальное значение площади сечения загрузочного желоба при входе в укрытие F_{on} рассчитывается по формуле $F_{on} = \frac{Q}{3600 \cdot \psi \cdot v \cdot \rho}$, где Q - расход сыпучего материала через загрузочный желоб, м³/с; F_{on} - площадь сечения загрузочного желоба при входе в укрытие, соответствующая принятому расходу через загрузочный желоб, м²; v - скорость движения материала по загрузочному желобу, м/с; ρ - плотность материала, кг/м³; ψ - коэффициент наполнения загрузочного желоба, представляющий собой объем сыпучего материала, приходящегося на единицу объема загрузочного желоба. Коэффициент наполнения прямо пропорционален расходу через загрузочный желоб 2 и обратно пропорционален площади сечения загрузочного желоба при входе в укрытие. Изменение коэффициента наполнения может быть вызвано неравномерным распределением сыпучего материала на подающем конвейере или изменением производительности подающего конвейера. Данное изобретение обеспечивает поддержание постоянным коэффициента наполнения, а значит постоянным и количество воздуха, эжектируемого в укрытие потоком материала по загрузочному желобу 2 путем перемещения заслонки 3, т.е. обеспечивается поддержание оптимального значения площади сечения загрузочного желоба при входе в укрытие. Это позволяет обеспечить устойчивую работу аспирационного укрытия с вентилятором постоянной производительности.

Однако, явным недостатком данного способа является возможность забивания и, как следствие, заклинивания перемещающейся заслонки из-за попадания мелких частиц материала между перегородкой и стенками желоба.

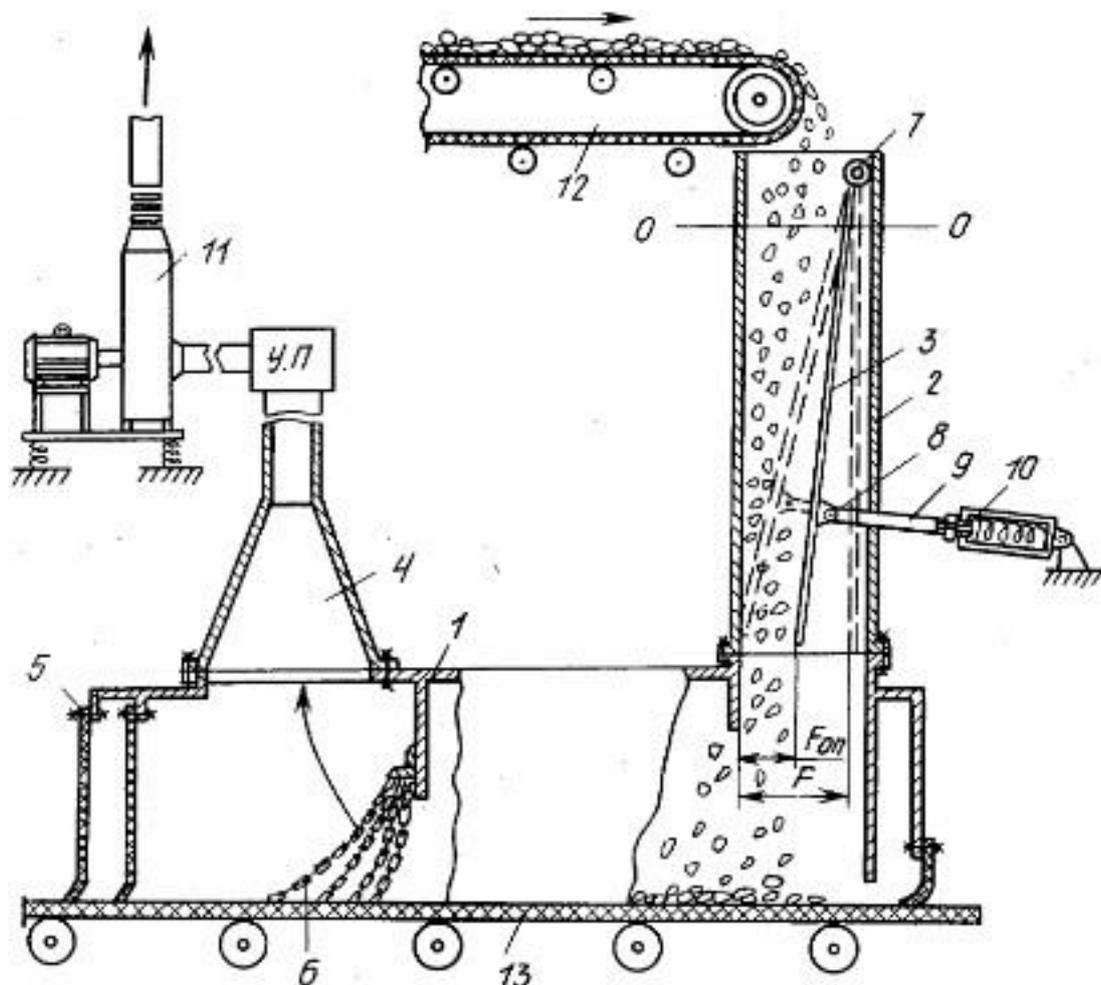


Рисунок 1.6 – Укрытие с подвижной перегородкой в желобе

Большинство из способов снижения эжекции воздуха, помимо увеличения аэродинамического сопротивления желоба, направлены также на снижение скорости падения материала. С участием автора разработано укрытие, конструкция которого исключает возможность забивания рабочих элементов [43]. Данное аспирационное укрытие места выгрузки сыпучего материала (рисунок 1.7), состоит из загрузочного желоба 1, корпуса 2, аспирационной воронки 3, расположенной на крышке корпуса, поперечной перегородки, установленной на шарнире 4 и имеющей механизм возврата 5, которая является днищем 6

загрузочного желоба, при этом загрузочный желоб образует острый угол с крышкой корпуса 2.

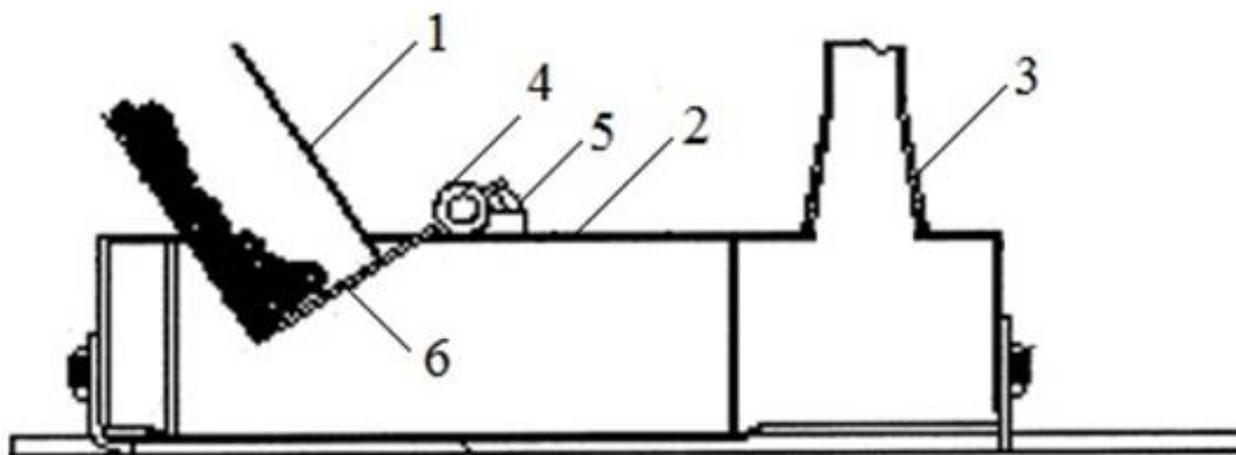


Рисунок 1.7 – Аспирационное укрытие с дном

Материал с конвейера по загрузочному каналу 1, вместе с эжектируемым воздушным потоком, по ходу своего движения попадает на днище 6 загрузочного желоба. По мере наполнения днище 6 отклоняется и, через образовавшееся отверстие, сыпучий материал поступает в корпус 2 укрытия. Эжектируемый воздух, достигая днища загрузочного желоба 1, отражается от него и возвращается в полость загрузочного желоба 1, не попадая в полость корпуса 2. Кроме того днище загрузочного желоба 1 обеспечивает устойчивую работу аспирационного укрытия. Главное достоинство данного изобретения это невозможность его забивания или заклинивания, а в случае износа движущихся элементов их легко заменить.

Рассмотренные устройства в желобах укрытий оказывают гидравлическое сопротивление потоку эжектируемого воздуха или же снижают конечную скорость падения материала. Основным недостатком большинства перечисленных укрытий и способов снижения эжекции воздуха является невозможность обслуживания и быстрой замены рабочих элементов, расположенных в загрузочном желобе, а также возможность забивания, заклинивания этих элементов от действия потока сыпучего материала.

1.4.2. Использование замкнутой циркуляции воздуха

Одним из перспективных и более интересных с технической точки зрения способов снижения эжекции воздуха является организация замкнутой рециркуляции воздуха в загрузочном желобе посредством использования байпасной камеры. Рециркуляция может быть полной и частичной. Полная рециркуляция подразумевает собой отсутствие местного отсоса от укрытия, т.е. поступающий в укрытие воздух будет полностью идти на рециркуляцию. В этом случае рециркулируемый воздух можно подавать в рабочее помещение. Это позволит сэкономить на обогреве помещения в зимний период, однако необходимо, чтобы подаваемый воздух очищался и соответствовал требованиям ПДК рабочей зоны [10]. В реальных условиях добиться полной рециркуляции, без использования аспирации, практически невозможно из-за образования зон избыточного давления в укрытии при перегрузках, которые способствуют выбиванию запыленного воздуха.

На практике чаще всего используется частичная рециркуляция воздуха, которая может быть как естественной, так и принудительной. Естественная рециркуляция осуществляется за счет градиента давления, который возникает в загрузочном желобе в результате эжекции воздуха потоком сыпучего материала, а принудительная - посредством внешнего побудителя тяги. Область избыточного давления и разрежения загрузочного желоба связаны аэродинамическим каналом, который и называется байпасом. В зависимости от конструкции укрытия, он может размещаться внутри желоба, у его боковой стенки или вне желоба. Имеется большое количество аспирационных укрытий использующих рециркуляцию воздуха [44-51].

Как уже было отмечено, использование только лишь рециркуляции воздуха без аспирации не решает задачу локализации мест пылевыделения, а позволяет частично сократить объем удаляемого воздуха. Помимо избыточного давления,

невозможность полного устранения неплотностей в укрытии приводного барабана загрузающего конвейера, также влияет на рециркуляцию.

Место расположения выходного отверстия байпасного канала определяет возможность использования аспирации для перегрузочного узла. Большой эффект рециркуляции достигается при высоком аэродинамическом сопротивлении между входным отверстием байпасного канала и пылеприемным сечением местного отсоса.

Неудачным примером использования рециркуляции служит конструкция наклонного желоба (рисунок 1.8) [47], состоящая из загрузочного желоба 1, внутри которого установлены пластины 2, образующие с боковыми стенками желоба 1 рециркуляционные зоны 3, разгрузочного отверстия 4, снабженного аспирационной камерой 5. Сыпучий материал, двигаясь по загрузочному желобу 1, вовлекает в движение некоторое количество воздуха, образуя тем самым в аспирационной камере 5 область избыточного давления необходимую для организации процесса рециркуляции. Однако, в этом случае избыточное давление будет выталкивать воздух из аспирационной камеры 5 не только в зоны рециркуляции 3, но и через неплотности в рабочее помещение. Получается, что работа системы аспирации теряет всякий смысл. Увеличивая разрежение в аспирационной камере за счет местного отсоса можно снизить избыточное давление, но тогда теряется смысл в использовании рециркуляции.

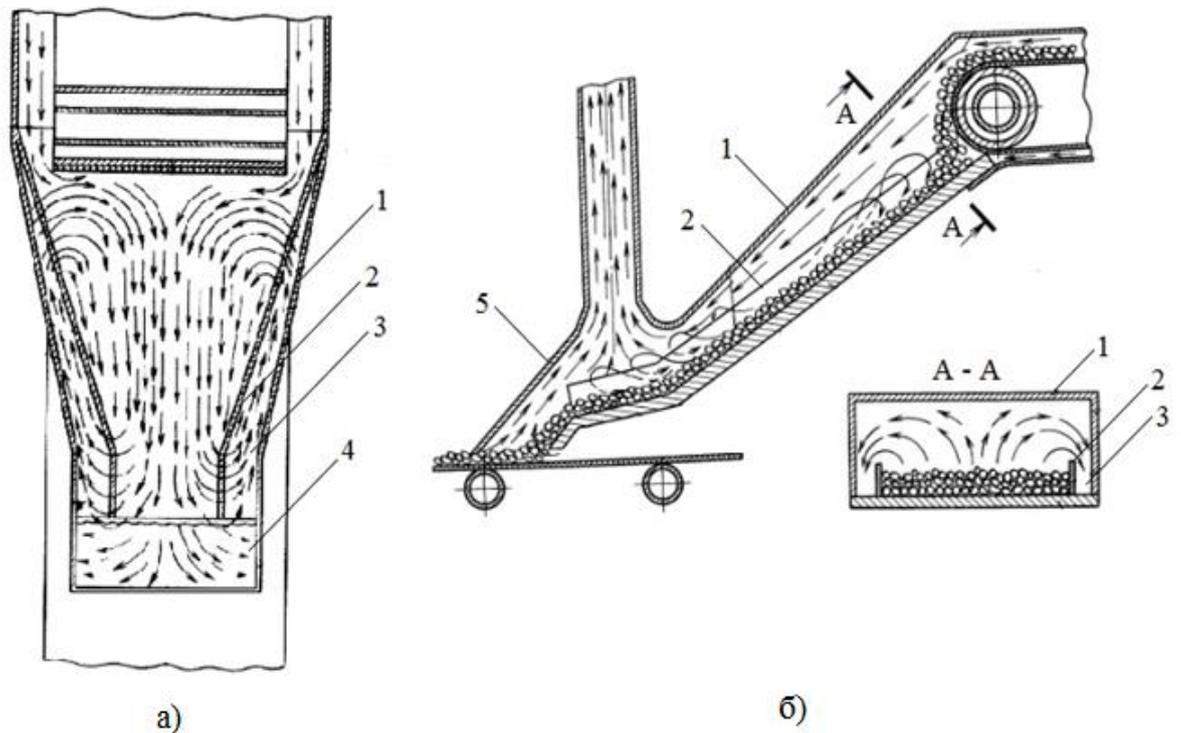


Рисунок 1.8 – Наклонный желоб с естественной циркуляцией (сопротивление между аспирационной воронкой и рециркуляционным каналом отсутствует): а) вид сверху в разрезе, б) вид сбоку в разрезе.

Другим примером является конструкция укрытия с двойными стенками (рисунок 1.9) [48]. Устройство имеет наружный короб 1, внутри которого расположен внутренний короб 2 с байпасным каналом 3, примыкающим к желобу 4. По периметру наружного 1 и внутреннего 2 коробов установлены резиновые уплотнения 5. С противоположной стороны желоба закреплена жесткая перегородка 6, имеющая противовес 7, а в нижней части герметизирующий каток 8, который может свободно вращаться и перемещаться по высоте в момент соприкосновения его поверхности с потоком материала на конвейерной ленте. Данное укрытие позволяет осуществлять аспирацию перегрузочного узла на ряду с рециркуляцией воздуха. Материал, падая на конвейер, создает область избыточного давления, под действием которого происходит выбивание пыли из внутреннего короба в наружный короб укрытия. Резиновые уплотнения создают сопротивление потоку вытесняемого из укрытия воздуха, при этом аспирационная воронка поддерживает в полости наружного короба необходимое разрежение для

исключения возможности выбивания пыли в помещение. Часть воздуха удаляется из наружного короба местным отсосом, а другая его часть образует циркуляционное кольцо по байпасному каналу и желобу.

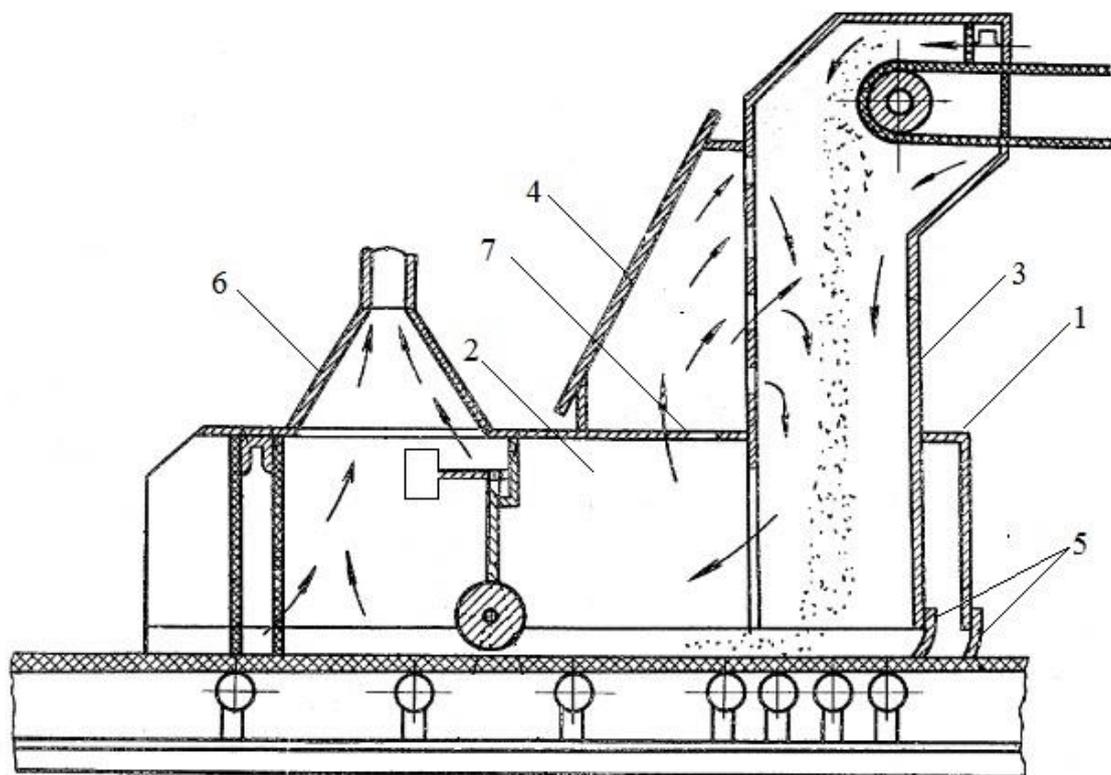


Рисунок 1.9 – Укрытие с рециркуляционным каналом (канал гидравлически связывает желоб и нижнее укрытие)

Похожим устройством, успешно сочетающим в себе аспирацию и рециркуляцию воздуха, является укрытие с одинарными стенками и магнитным герметизатором (рисунок 1.10) [49].

Загрузочный желоб 1, имеет байпасный канал 2, по которому происходит циркуляция воздуха. Входное отверстие 3 в байпасный канал 2 находится в нижней части желоба 1. Воздух за счет увеличения градиента давления в желобе 1 при падении материала выталкивается в это отверстие 3 и по байпасу 2 возвращается в желоб 1. В данном случае при перегрузке ферромагнитного материала герметизация осуществляется с помощью магнитной системы 4, которая оказывает дополнительное сопротивление для поступающего по желобу 1 воздуха.

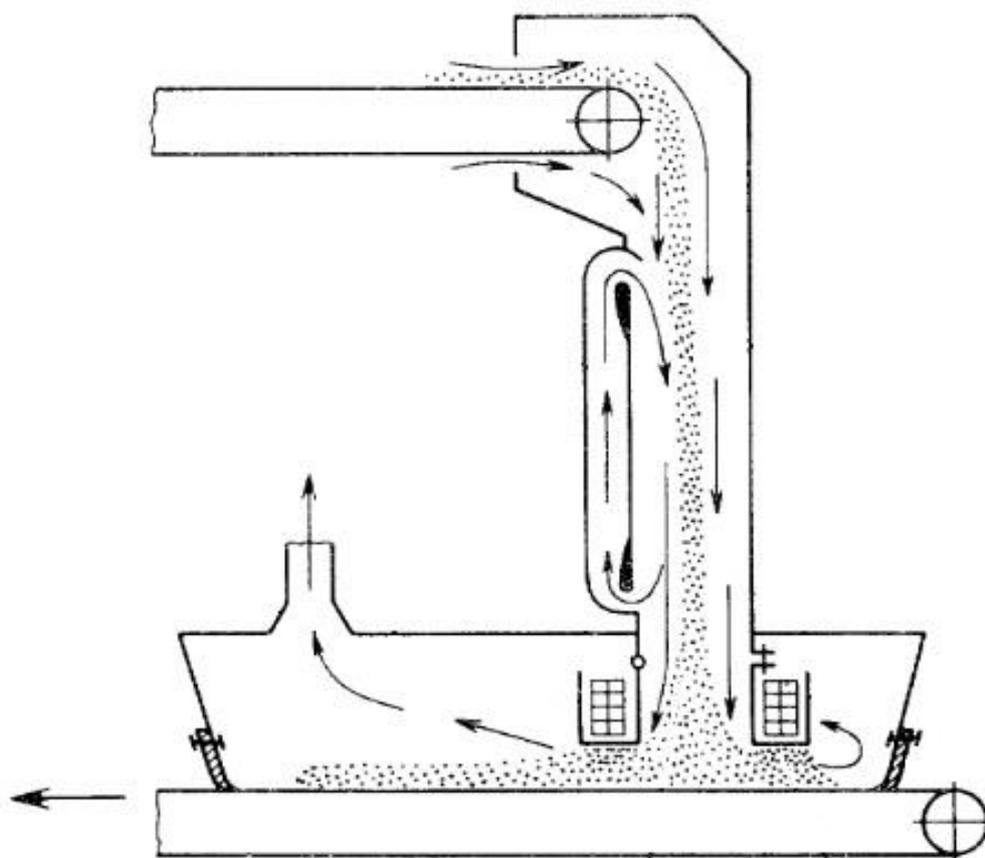


Рисунок 1.10 – Укрытие с байпасным каналом (байпас гидравлически связывает нижнюю и верхнюю часть желоба)

Использование магнитного герметизатора снижает содержание пыли в аспирируемом воздухе, посредством задержания частиц в пористой среде герметизатора.

В конструкциях некоторых укрытий используются способы и элементы, увеличивающие или создающие рециркуляцию воздуха (рисунок 1.11) [103]. Данное укрытие состоит из желоба 1 и приемного кожуха 2. Желоб 1 разделен вертикальной перегородкой 3 на загрузочную полость 4 и байпасную 5. В верхней части перегородки 3 имеется отверстие 6. По центру в нижней части желоба 1 имеется колесо 7 с лопастями.

Падающий поток материала попадает на лопасть колеса 7 и приводит его в движение. Эжектируемый воздух, двигаясь по загрузочной 3 полости желоба, направляется колесом 7 в байпасную полость, а из нее через отверстие 6 в

загрузочную полость 3 желоба 1, дополнительно создавая сопротивление для подсасываемого в верхней части желоба 1 воздуха. Однако, необходимо, чтобы давление в загрузочной полости 3 при перетекании воздуха через отверстие 6 в верхней части было ниже атмосферного, иначе произойдет выбивание пыли.

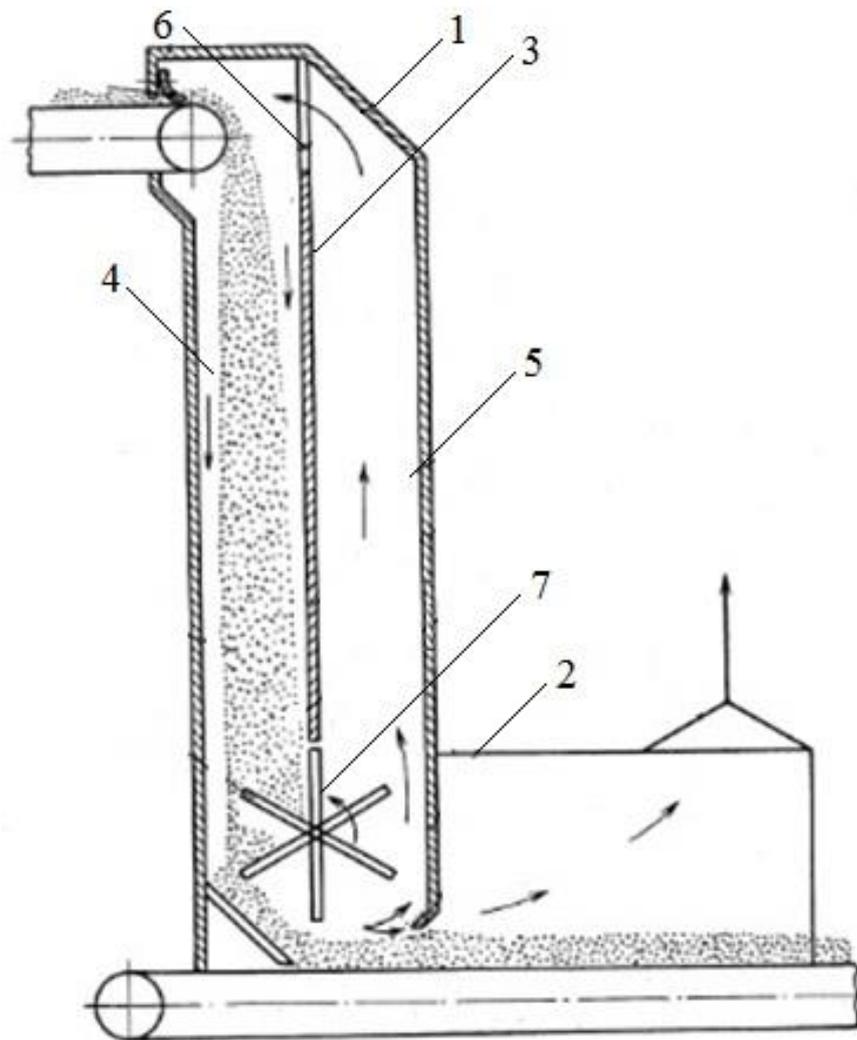


Рисунок 1.11 – Укрытие с байпасным каналом (загрузочный желоб разделен перегородкой на байпансую и загрузочную части)

Имеется конструкция укрытия, в котором для увеличения зоны разрежения используются перфорированные отверстия (рисунок 1.12) [104]. Устройство состоит из укрытия 1, соединенного с желобом 2, в нижней части которого, на входе в укрытие, расположен аэродинамический циркуляционный затвор в виде двух завихрителей с лопатками - нижнего 3 и верхнего 4, установленных друг на против друга на заданном расстоянии и имеющих противоположное направление

закрутки. Нижний завихритель 3 установлен на наружной стенке желоба 2 и может перемещаться по высоте с возможностью фиксации.

Внутри желоба 2 имеется труба с перфорированной стенкой 5, установленная коаксиально наружной стенке желоба 2, образуя при этом межстеночное пространство, верхний завихритель 4 жестко закреплен на внутренней перфорированной стенке 5, межстеночное пространство гидравлически сообщено с полостью, образованной завихрителями.

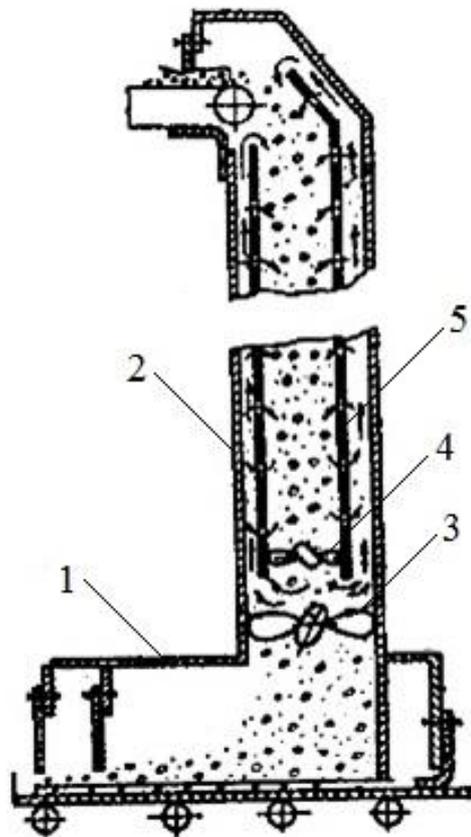


Рисунок 1.12 – Устройство с перфорированной грузочной трубой (перфорированная труба находится в полости желоба)

Материал с конвейера поступает в полость трубы с перфорированной стенкой 5 и, вместе с эжектируемым воздухом, проходит через завихрители 3 и 4. Материал проходит через аэродинамический затвор завихрителей и попадает в укрытие. Поток эжектируемого воздуха, проходя через завихритель 4, отражается от лопаток завихрителя 3 аэродинамического затвора и попадает в полость между стенками перфорированной трубы 5 и желоба 2 и движется в верхнюю часть

желоба 2, при этом частично через перфорированную стенку попадает в полость трубы 5, а другая его часть, поднимаясь до входного сечения желоба 2, вновь увлекается потоком материала. При этом, проходя через завихрители 3 и 4, поток эжектируемого воздуха приводит в движение их лопасти, в результате чего образуются вихри, создающие сопротивления эжектируемому потоку воздуха.

Данная конструкция укрытия интересна тем, что имеется 2 циркуляционных кольца: движение эжектируемого воздуха по байпасной камере в верхний короб укрытия и движение эжектируемого воздуха через перфорированные отверстия в полость трубы. Однако исследования процесса рециркуляции данного устройства не проводились.

В рассмотренных выше аспирационных укрытиях рециркуляция воздуха происходит естественным путем (имеется сопротивление между местным отсосом и входным отверстием в байпасный канал).

Как показывает опыт, перепад давлений между входным и выходным сечениями гравитационных желобов, возникающий при перегрузке материала, составляет 10-50 Па.

Согласно проведенным исследованиям [105], применение естественной рециркуляции позволяет снизить объём воздуха, поступающего по желобу в укрытие на 40...60 %. Таким образом, можно существенно снизить количество аспирируемого воздуха. Однако, полностью исключить аспирацию при применении естественной циркуляции не представляется возможным.

Некоторые авторы предлагают использовать для организации замкнутой циркуляции воздуха дополнительные побудители тяги, увеличивающие рециркуляцию.

К примеру, предлагается использовать гидрофорсунки, установленные внутри укрытия (рисунок 1.13), чтобы создать эжектирующий поток диспергированной воды [51, 52, 63, 106]. Работа форсунок также позволяет снизить концентрацию взвешенной пыли в воздухе укрытия. Не смотря на это, использование лишь факела диспергированной воды не обеспечит локализацию пылеобразования. Отсутствие аспирации приведет к появлению областей

избыточного давления в полости укрытия, а, следовательно, к выбиванию запыленного воздуха из него. Тем не менее, применение факела диспергированной воды широко распространено из-за высокой эффективности пылеулавливания.

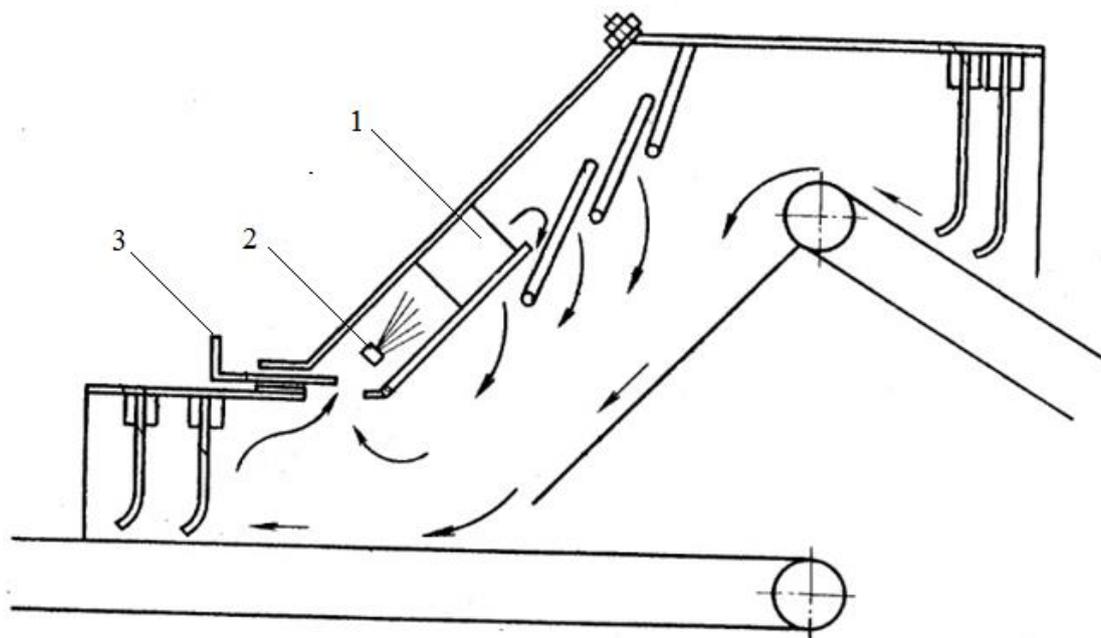


Рисунок 1.13 – Устройство с гидрофорсунками
(принудительная циркуляция создается потоком водяных капель)

Более эффективным, в плане использования дополнительных побудителей тяги, способом является использование вентилятора для осуществления рециркуляции [53, 54].

Принцип работы и аэродинамические характеристики аспирационных систем с принудительной рециркуляцией (рисунок 1.14), разработанных Криворожским горнорудным институтом [53] следующие.

Аспирационная схема состоит из верхнего укрытия 1 и нижнего аспирируемого укрытия 3, аспирационного патрубка 4, пылеуловителя 5, вытяжного вентилятора 6, байпасного канала 7, регулируемой задвижки 8, вытяжного воздуховода 9. Часть удаляемого из аспирируемого укрытия 3 воздуха нагнетается вентилятором 6 по байпасному каналу 7 в полость верхнего укрытия 1 и по желобу 2 возвращается в аспирируемое укрытие 3, образуя, таким образом, циркуляционное кольцо. Задвижка 8, установленная на вытяжном воздуховоде 9,

регулирует количество воздуха нагнетаемого в верхнее укрытие 1, при этом в полости верхнего укрытия 1 не должно образовываться избыточное давление. Оставшийся воздух выбрасывается по вытяжному воздуховоду 9.

Проведенные исследования и промышленные испытания [107], показали, что использование данной схемы аспирации может позволить добиться полной рециркуляции. В этом случае поток рециркулируемого воздуха будет замещать объем воздуха, эжектируемый падающим сыпучим материалом, а это значит, что количество аспирируемого воздуха останется прежним, т.е. равным количеству аспирируемого воздуха при использовании обычной схемы аспирации.

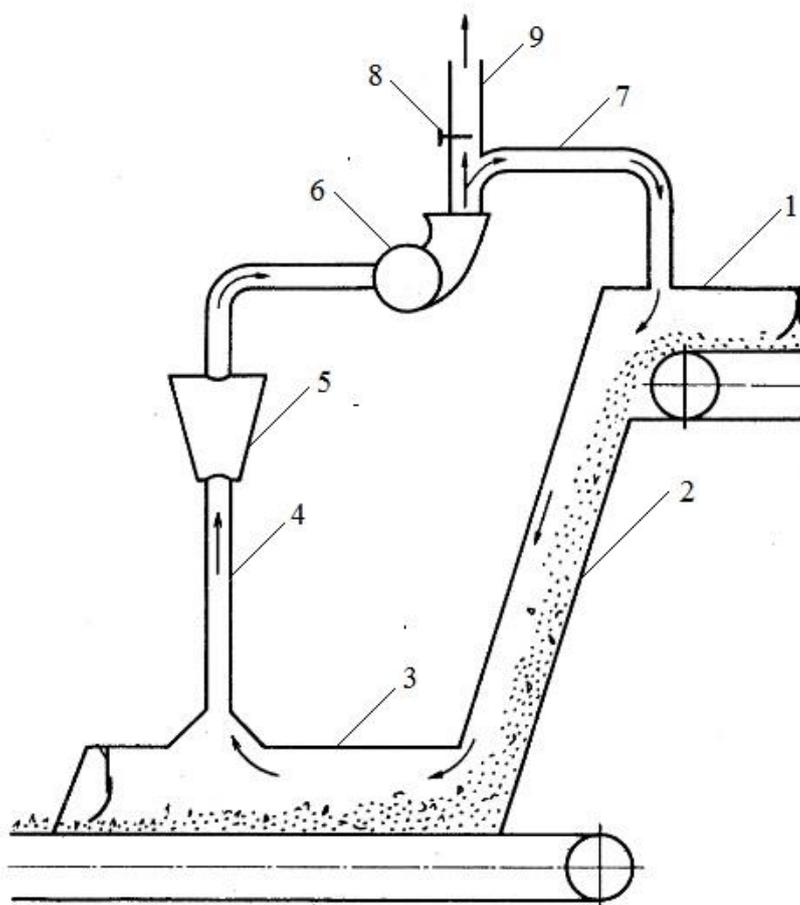


Рисунок 1.14 – Устройство с принудительной циркуляцией
(для циркуляции используется вентилятор)

Такая возможность замещения является достаточно спорной. Выбор места ввода рециркуляционного воздушного потока, который осуществляется по оси канала, поспособствует увеличению эжекционного давления P_9 , что согласно (1.4)

приведет к увеличению количества эжектируемого воздуха, а это делает данную систему неэффективной.

В работе [94] исследовалось аспирационное укрытие с принудительной рециркуляцией (рисунок 1.15).

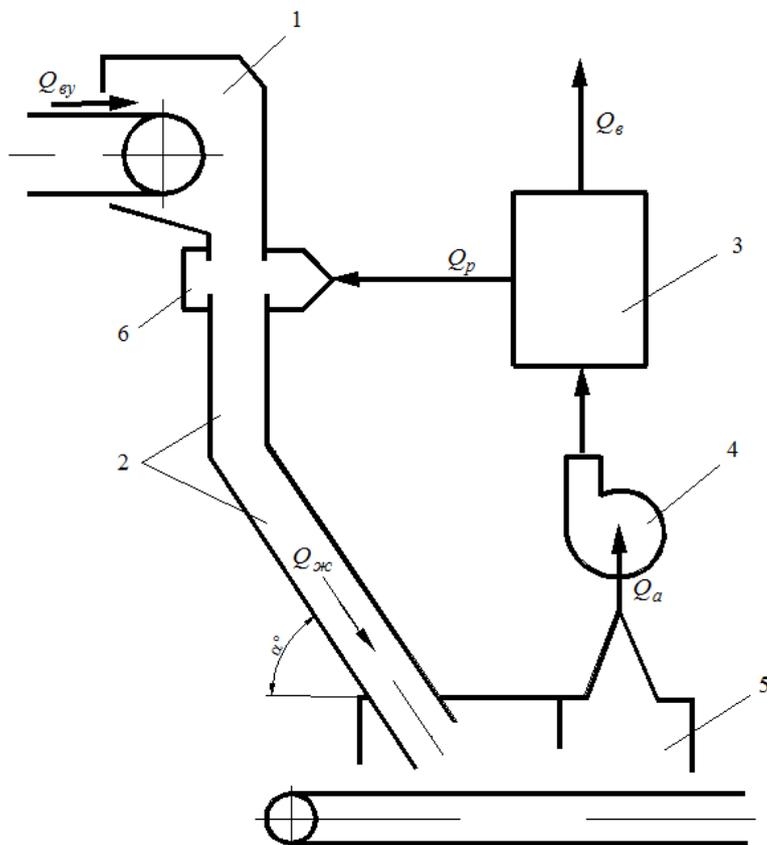


Рисунок 1.15 – Схема системы аспирации узла перегрузки:

- 1 – верхнее укрытие; 2 – загрузочный канал; 3 – пылевой концентратор; 4 – вентилятор;
5 – аспираируемое нижнее укрытие; 6 – затвор

В отличие от устройства [53], данная конструкция обладает способом подачи рециркуляционного воздуха в желоб, что исключает увеличение эжекционного давления, и, как следствие, увеличение объемов эжектируемого воздуха.

Согласно результатам исследований, количество удаляемого воздуха при такой схеме подачи рециркулируемого воздуха снизилось почти на 50%.

Однако, все отмеченные выше преимущества принудительной рециркуляции, по мнению автора, никак не влияют на снижение энергоемкости и энергопотребления системы, т.к. количество аспираируемого воздуха остается

неизменным, а с учетом перетекания эжектируемого (рециркулируемого) воздуха по желобу будет происходить образование зон избыточного давления.

Существует конструкция укрытия (рисунок 1.16), в котором сочетаются естественная и принудительная рециркуляция [55].

Данное укрытие состоит из желоба 1, приемного короба 2, рециркуляционного канала 3, перфорированной стенки 4, дополнительного отсоса 5, отверстий 7. Стенки желоба 1 и рециркуляционного канала 3 образуют камеру с дополнительным отсосом, куда эжектируемый воздух поступает под действием разрежения через перфорированные отверстия в стенке 4. Также большая часть эжектируемого воздуха, налипая на перфорированную поверхность стенки 4, поднимается по каналу 3 и через отверстия 7 возвращается в полость желоба 1.

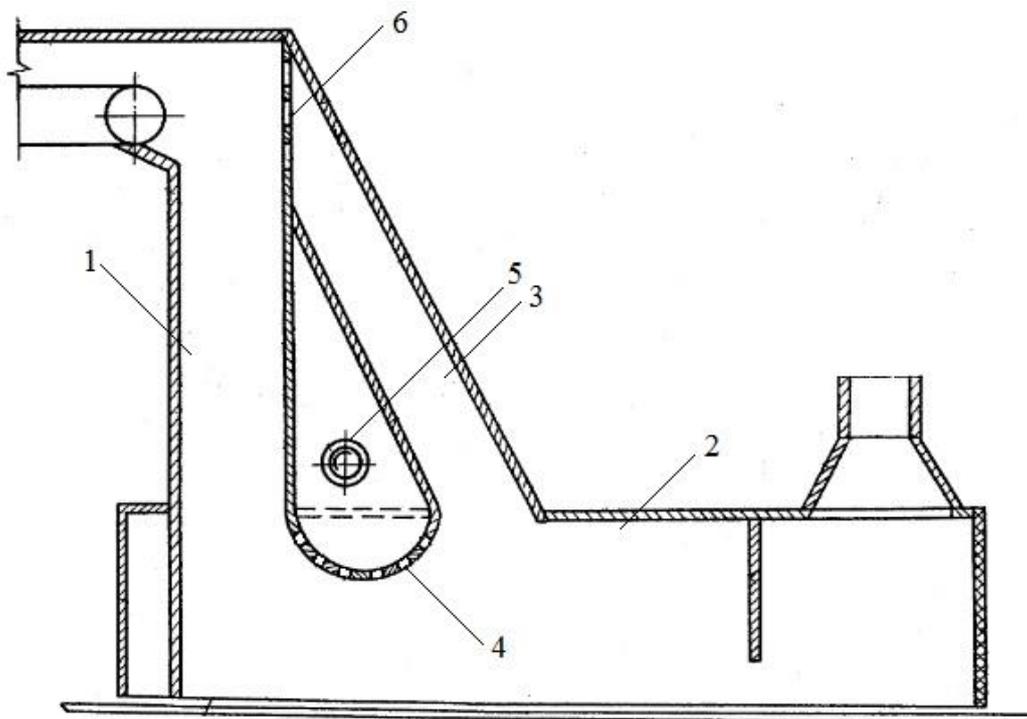


Рисунок 1.16 – Устройство с совместным использованием естественной и принудительной рециркуляции

Еще одно применение байпасной камеры можно наблюдать на примере телескопического погрузочного устройства, снабженного аспирационными системами (рисунок 1.17) [128]. Данное устройство используется при загрузке

большого количества сыпучего материала в крупные емкости, например, трюм корабля.

По загрузочному конвейеру 10 материал попадает в полость верхнего укрытия 1 и под действием гравитационных сил падает в телескопический желоб 2, двигаясь по которому он попадает в полость нижнего укрытия 4.

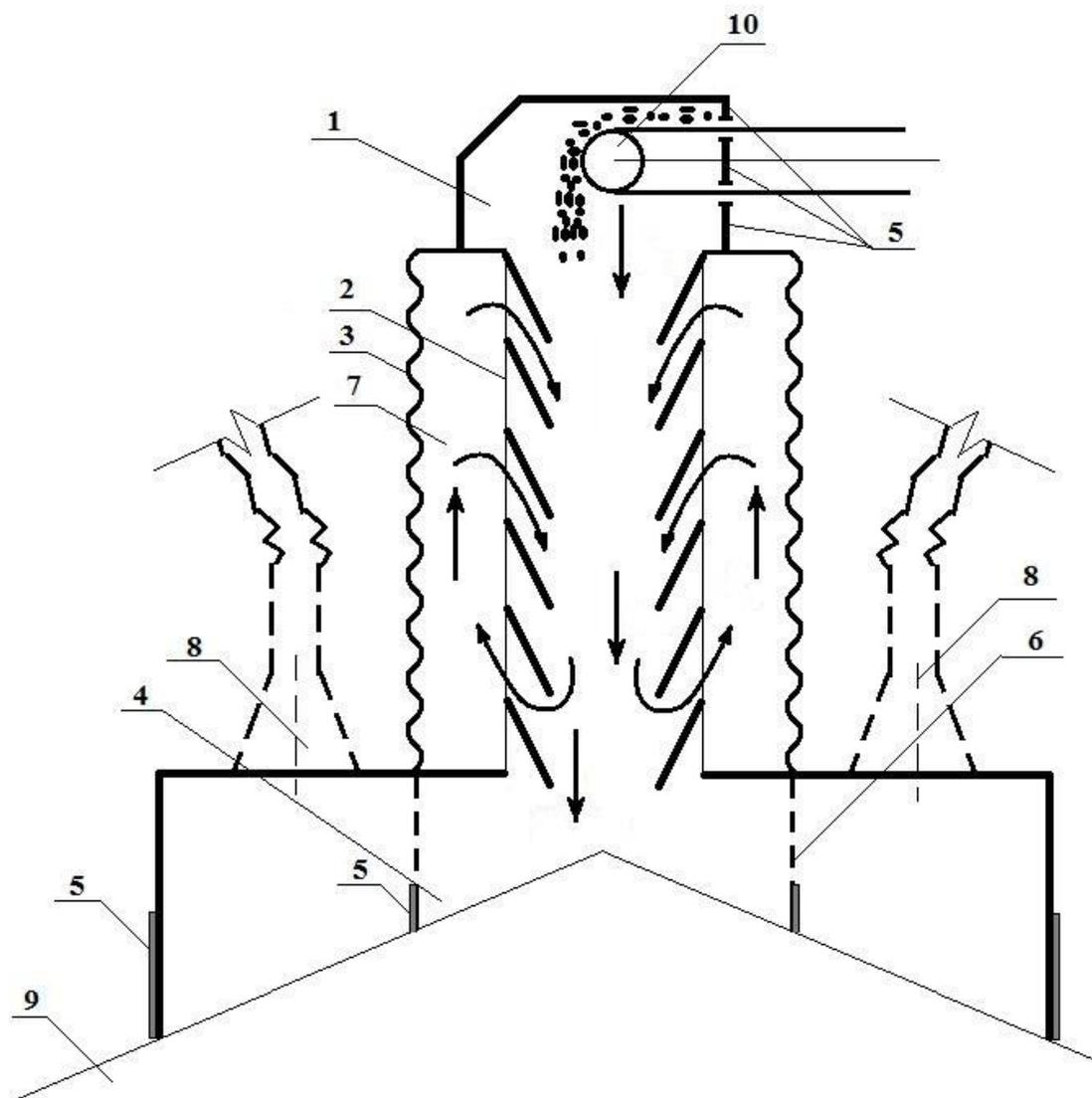


Рисунок 1.17 – Схема эжекции воздуха в телескопическом желобе: 1 - верхнее укрытие; 2 - телескопический желоб; 3 - наружный рукав; 4 - нижнее укрытие; 5 - уплотняющие фартуки; 6 - возможные перегородки; 7 - байпасная камера; 8 - местные отсосы; 9 - штабель сыпучего материала; 10 - конвейер

Эжектируемый воздух через неплотности в местах соединения телескопического желоба 2 в его нижней части выходит в полость байпасной камеры 7, при этом снижая избыточное давление в желобе 2, образованной

стенками наружного рукава 3, а в верхней части желоба 2 через неплотности вовлекается снова в его полость. Таким образом, появляется замкнутое циркуляционное кольцо. Разрежение в нижнем укрытии 4 создается с помощью отсосов 8. Наличие уплотняющих фартуков 5 также снижает количество выбиваемого из нижнего укрытия 4 воздуха и оказывает сопротивление подсасываемому воздуху в верхнее укрытие 1.

По словам авторов [108] использование данной системы позволяет существенно снизить количество эжектируемого воздуха, а также снизить количество воздуха, выбиваемого через неплотности загружаемой емкости в 1,5 раза.

Из проведенного аналитического обзора устройств, снижающих количество эжектируемого воздуха при перегрузках сыпучего материала, следует, что на данный момент снижение энергоемкости аспирационного укрытия возможно с помощью организации в нем замкнутой циркуляции воздуха посредством байпасной камеры. Для увеличения области разрежения в полости байпасной камеры предлагается использовать перфорацию желоба. В результате этого было разработано и защищено патентом РФ на полезную модель № 146813 аспирационное укрытие (рисунок 1.18), отличительной особенностью которого является цилиндрическая байпасная камера, соосно расположенная с загрузочным желобом, имеющим перфорированные стенки [109]. Укрытие состоит из верхнего короба 1, нижнего короба 2, перфорированного желоба 3, цилиндрической байпасной камеры 4, приемной камеры 5, образованной внутренними стенками 6, герметизирующих уплотнений 7, аспирируемой части 8, резинового фартука 9, аспирационной воронки 10. Стрелками на рисунке показано направление движение эжектируемого воздуха при выходе из желоба в приемную камеру укрытия.

Перегружаемый по перфорированному желобу 3 материал попадает вместе с эжектируемым воздухом в приемную камеру 5. Часть эжектируемого воздуха поднимается по байпасной камере 4 в полость верхнего короба 1 и снова попадает в желоб 3, образуя циркуляционное кольцо. Такое перетекание воздуха далее

будет называться транзитным (показано зелеными стрелками). Другая часть эжектируемого воздуха, перетекает через отверстия в стенках желоба 3, аналогично поднимается в полость верхнего короба 1 и далее рециркулирует. По ходу движения этого воздуха он может перетекать в полость желоба 3 через отверстия расположенные в верхней части, т. к. в этой зоне внутри желоба 3 наибольшая область разрежения, создаваемая потоком падающего материала (показано синими стрелками). Остальной воздух, не идущий на рециркуляцию, попадает в аспирируемую камеру 8 и удаляется из укрытия аспирационной воронкой 10 (показано красными стрелками).

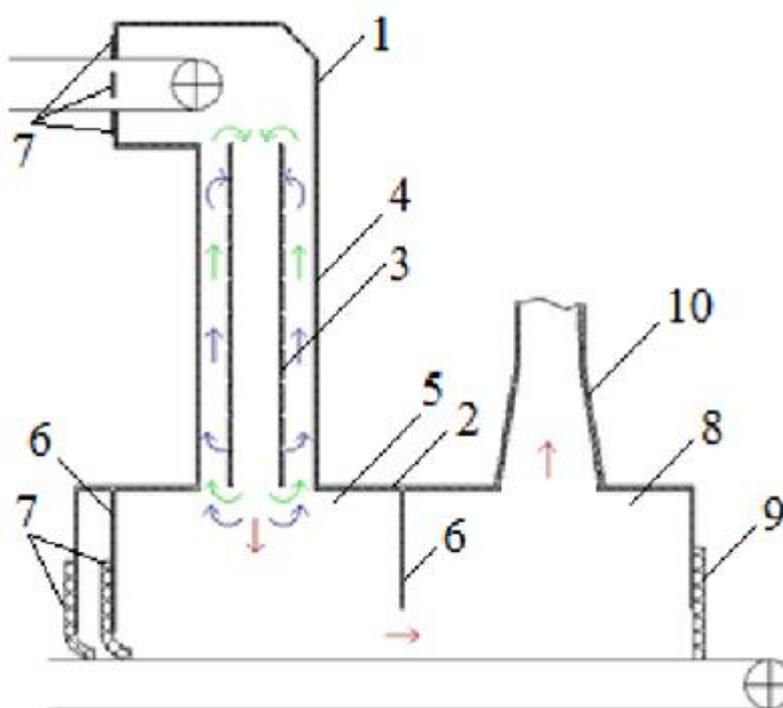


Рисунок 1.18 – Аспирационное укрытие с байпасной камерой и перфорированным желобом (Патент РФ № 146813): 1 - верхнее укрытие, 2 - нижнее укрытие, 3 - перфорированный желоб, 4 - байпасная камера, 5 - приемная камера, 6 - внутренние стенки (образуют приемную камеру), 7 - герметизирующие уплотнения, 8 - аспирируемая камера, 9 - резиновый фартук, 10 - аспирационная воронка

Такая конструкция укрытия проста в изготовлении и может, как будет показано далее, снизить количество удаляемого воздуха в среднем на 60%.

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

1. В результате проведенного анализа имеющихся средств и способов, направленных на локализацию мест пылеобразования при конвейерных перегрузках, выявлено, что наиболее актуальным направлением по совершенствованию конструкций аспирационных укрытий является разработка средств и способов, позволяющих снизить расход аспирируемого воздуха.

2. Перспективным способом снижения расхода эжектируемого воздуха является организация замкнутой циркуляции запыленного воздуха в перегрузочном желобе без использования дополнительных побудителей тяги, т.е. естественным путем за счет перепада давлений.

3. Эффективным способом создания естественной циркуляции при перегрузке сыпучего материала в аспирационное укрытие является использование байпасной камеры, аэродинамически связанной с загрузочным желобом, а также повышение сопротивления между входным отверстием байпасной камеры и аспирационной воронкой.

4. Наличие перфорированных стенок может увеличить область разрежения и, следовательно, увеличить расход рециркулируемого воздуха.

5. Предложена конструкция аспирационного укрытия, позволяющая эффективно снижать расход эжектируемого воздуха по сравнению с имеющимися на сегодняшний день аналогами, путем организации рециркуляции эжектируемого воздуха по каналам байпасной камеры и через перфорацию стенок загрузочного желоба.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КРУГЛОМ КАНАЛЕ С КОМБИНИРОВАННОЙ БАЙПАСНОЙ КАМЕРОЙ¹

2.1. Основные расчётные соотношения

Движение воздуха в перегрузочной трубе (рисунок 2.1) возникает за счет увлечения воздуха потоком падающего сыпучего материала и разрежения в нижнем укрытии, возникающего вследствие работы вентилятора аспирационной системы. Рециркуляция воздуха осуществляется через отверстия перфорации, равномерно нанесённые на стенки трубы, и через торцевые каналы на концах байпасной камеры (комбинированное байпасирование). Воздух поступает из полости нижнего укрытия в байпасную камеру и выходит в верхнее не аспирируемое укрытие. Разрежение в этом укрытии снижается и уменьшается расход транзитного воздуха Q_1 . При движении восходящего потока воздуха в байпасной камере его расход растёт, за счет поступления эжектируемого воздуха через отверстия в стенках трубы в нижней её части и падает в верхней части. Наблюдается два кольца рециркуляции: внутреннее кольцо циркуляции эжектируемого воздуха и внешнее кольцо циркуляции транзитного воздуха между укрытиями узла перегрузки.

Количественная оценка расхода рециркулируемого воздуха и снижения объёма эжектируемого воздуха, нагнетаемого в нижнее аспирируемое укрытие, отличается от ранее рассмотренных трудов [25, 110-112] тем, что скорость воздушного потока и статические давления на торцах байпасного канала и перегрузочной трубы не одинаковы. Это усложняет анализ снижения расхода эжектируемого воздуха. Математически задача сводится к решению системы трёх нелинейных алгебраических трансцендентных уравнений. При решении дифференциальных уравнений течения воздуха через отверстия на боковой

¹ Впервые опубликовано в серии статей [126, 127].

При формировании граничных условий были выделены три характерных сечения: начальное $N-N$ ($\tilde{x} = 0 + \tilde{\varepsilon}$, т.е. удалённое на малое расстояние ε от начала координат); промежуточно-экстремальное $M-M$ (удалённое на величину \tilde{x}_m от начала системы координат), в котором наблюдаются экстремальные скорости воздушного потока, расходы рециркулируемого и эжектируемого воздушных потоков; конечное $K-K$ (сечение при $\tilde{x} = \tilde{l} - \tilde{\varepsilon}$).

Размерные величины здесь и далее обозначены верхней волнистой линией \sim ; усреднённые по длине \tilde{l} - прямой чертой над буквой или нижним индексом s ; безразмерные величины без специальных символов.

Сечения трубы и байпасной камеры равны соответственно \tilde{S}_u (м^2) и \tilde{S}_ω (м^2), перфорация стенок трубы однородна по всей длине. Уравнения неразрывности имеют вид:

$$\frac{du}{dx} = \frac{\tilde{S}_0}{\tilde{S}_u} w; \quad \frac{d\omega}{dx} = \frac{\tilde{S}_0}{\tilde{S}_\omega} w, \quad (2.1)$$

где $\tilde{S}_0 = \tilde{\Pi}\tilde{\varepsilon}_0$ (м^2) - сумма всех площадей перфорационных отверстий боковой поверхности трубы ($\tilde{\Pi}$ - периметр сечения трубы, м; \tilde{l} - длина трубы, м; ε_0 - степень перфорации стенок, безразмерная величина).

Соотношение $r = \tilde{S}_\omega / \tilde{S}_u$ постоянно по длине, поэтому система уравнений (2.1) преобразована к следующему виду:

$$du = r d\omega \Rightarrow u - r\omega = z - \text{const} = u_n - r\omega_n = u_k - r\omega_k. \quad (2.2)$$

Баланс расходов воздушных потоков для укрытий:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{Q}_1 + \tilde{\omega}_n \tilde{S}_\omega &= \tilde{u}_n \tilde{S}_u \\ \tilde{u}_k \tilde{S}_u &= \tilde{Q}_1 + \tilde{\omega}_k \tilde{S}_\omega \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} \tilde{u}_n &= r\tilde{\omega}_n + \tilde{Q}_1 / \tilde{S}_u, \\ \tilde{u}_k &= r\tilde{\omega}_k + \tilde{Q}_1 / \tilde{S}_u, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где \tilde{Q}_1 - расход транзитного потока воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$. Постоянная величина z представляет собой отношение расхода \tilde{Q}_1 к максимальному расходу эжектируемого воздушного потока:

$$z = \frac{\tilde{Q}_1}{\tilde{v}_k \tilde{S}_u}.$$

Расход \tilde{Q}_1 является частью объёмного расхода аспирируемого из нижнего укрытия воздуха, $\tilde{Q}_a = \tilde{Q}_1 + \tilde{Q}_{nn}$, где \tilde{Q}_{nn} - объёмный расход воздуха, проникающего через неплотности укрытия.

Из уравнения (2.3) следует соотношение:

$$\frac{u_k - u_n}{\omega_k - \omega_n} = \frac{\tilde{S}_\omega}{\tilde{S}_u} \Rightarrow \tilde{S}_u (u_k - u_n) \tilde{v}_k = \tilde{S}_\omega (\omega_k - \omega_n) \tilde{v}_k = \tilde{Q}_R,$$

где \tilde{Q}_R - объёмный расход воздухообмена между потоками эжектируемого воздуха в загрузочной трубе и рециркулируемого в байпасном канале, м³/с.

Коэффициент рециркуляции определяется из выражения:

$$R_z = \frac{\tilde{Q}_\omega}{\tilde{Q}_u} = \frac{r\omega_k}{u_k} = \frac{u_k - z}{u_k} = 1 - \frac{z}{u_k}.$$

Уравнение динамики воздушного течения в цилиндрическом байпасном канале имеет следующий безразмерный вид:

$$dp_\omega + 4\omega d\omega = 0; \quad p_\omega = 2\tilde{p}_\omega / (\tilde{\rho}\tilde{v}_k^2); \quad \omega = \tilde{\omega} / \tilde{v}_k. \quad (2.4)$$

Уравнение эжектируемого воздушного потока в перфорированной трубе:

$$dp + 4udu = Ke(v - u)|v - u| / v \cdot dx, \quad Ke = 1.5\psi\beta_k \tilde{l} / \tilde{d}_e, \quad (2.5)$$

где ψ - коэффициент лобового сопротивления одной частицы; β_k - объёмная концентрация частиц в конце трубы; \tilde{d}_e - диаметр шара, равный по объёму частице (эквивалентный диаметр); \tilde{v}_k - скорость падения частиц в конце трубы.

Условие перетекания воздушного потока через перфорационные отверстия боковой поверхности загрузочной трубы:

$$p_\omega - p_w = \zeta_0 |w|w,$$

где w - безразмерная скорость перетекания воздушного потока.

С учётом первого уравнения системы (2.1) скорость w выражается через изменение скорости эжектируемого воздушного потока:

$$w = \frac{1}{E\sqrt{\zeta_0}} \frac{du}{dx}, \quad (2.6)$$

где E - безразмерный параметр, который характеризует степень перфорации боковой поверхности загрузочной трубы и к.м.с. отверстий:

$$E = \frac{\tilde{S}_0}{\tilde{S}_u \sqrt{\zeta_0}}.$$

В предположении, что площади торцевых сечений трубы и байпасного канала равны площади поперечного сечения загрузочной трубы и канала соответственно, краевые условия для скорости воздушного потока примут следующий вид:

в начальном сечении $N-N$ (при $x = 0$)

$$u(0) = u_n; \quad \omega(0) = \omega_n; \quad (2.7)$$

$$w(0) = \frac{u'(0)}{E\sqrt{\zeta_0}} = \gamma_w(0) \sqrt{\frac{|p_\omega(0) - p_u(0)|}{\zeta_0}}, \quad \gamma_w(0) = \text{signum}(p_\omega(0) - p_u(0)); \quad (2.8)$$

в конечном сечении $K-K$ (при $x = 1$)

$$u(1) = u_k; \quad \omega(1) = \omega_k; \quad (2.9)$$

$$w(1) = \frac{u'(1)}{E\sqrt{\zeta_0}} = \gamma_w(1) \sqrt{\frac{|p_\omega(1) - p_u(1)|}{\zeta_0}}, \quad \gamma_w(1) = \text{signum}(p_\omega(1) - p_u(1)). \quad (2.10)$$

Для статических давлений краевые условия выражены через к.м.с. и избыточные давления в укрытии узла перегрузки:

в сечении $N-N$

$$\left. \begin{aligned} p_u(0) &= p_1 - \zeta_{un} u_n^2; \\ p_\omega(0) &= p_1 - \zeta_{\omega n} \omega_n^2; \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

в сечении $K-K$

$$\left. \begin{aligned} p_u(1) &= p_2 - \zeta_{uk} u_k^2; \\ p_\omega(1) &= p_2 - \zeta_{\omega k} \omega_k^2, \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

где ζ_{un} , ζ_{uk} - к.м.с. входа эжектируемого воздуха в трубу и выхода из неё соответственно; $\zeta_{\omega n}$, $\zeta_{\omega k}$ - к.м.с. выхода восходящего воздушного потока из байпасной камеры и входа в неё соответственно; p_1 , p_2 - избыточные статические давления в верхнем и нижнем укрытиях соответственно. Величины этих давлений выражаются через к.м.с. ζ_1 неплотностей верхнего укрытия, к.м.с. ζ_p перегородки приёмной камеры, величины p_y - разрежения в нижнем укрытии и параметра z :

$$p_1 = -\zeta_1 \left(\frac{\tilde{S}_u}{\tilde{f}_1} \right)^2 z^2 = -\zeta_1^* z^2, \quad \zeta_1^* = \zeta_1 \left(\frac{\tilde{S}_u}{\tilde{f}_1} \right)^2; \quad (2.13)$$

$$p_2 = p_y + \zeta_p \left(\frac{\tilde{S}_u}{\tilde{f}_p} \right)^2 z^2 = p_y + \zeta_p^* z^2, \quad \zeta_p^* = \zeta_p \left(\frac{\tilde{S}_u}{\tilde{f}_p} \right)^2, \quad (2.14)$$

где \tilde{f}_1 - сумма площадей неплотностей верхнего укрытия, м²; \tilde{f}_p - сумма площадей зазоров между стенками приёмной камеры нижнего укрытия и грузённой конвейерной лентой, м²; \tilde{S}_u - площадь поперечного сечения загрузочной трубы, м².

2.2. Перегрузка сыпучего материала по трубе с непроницаемыми стенками

В этом параграфе рассматривается частный случай перегрузки сыпучего материала по трубе с непроницаемыми стенками ($\zeta_0 \rightarrow \infty$, $E = 0$).

Здесь, с небольшой погрешностью, предполагаются следующие равенства:

$$\begin{aligned} u_n &= u_k = u \equiv u_c - \text{const}, \\ \omega_n &= \omega_k = \omega \equiv \omega_c - \text{const}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

Тогда возможно интегрирование дифференциального уравнения динамики

эжектируемого воздушного потока (2.5) в аналитическом виде.

В случае равноускоренного падения частиц сыпучего материала, скорость

$$v = \sqrt{(1-n^2)x + n^2}; \quad n = \tilde{v}_0 / \tilde{v}_k$$

является независимой переменной интегрирования. Здесь \tilde{v}_0 - скорость частиц материала при входе в трубу.

В силу того что

$$dx = \frac{2v dv}{1-n^2},$$

исходное уравнение примет вид:

$$dp_y = \frac{2Ke}{1-n^2} (v - u_c) |v - u_c| dv,$$

решение которого при условиях (2.11), (2.12) и с учётом (2.15) представимо в виде критериального уравнения²:

$$Eu + u_c |u_c| = Bu \frac{|1 - u_c|^3 - |n - u_c|^3}{3}, \quad (2.16)$$

где Eu - критерий Эйлера, равный

$$Eu = \frac{p_2 - p_1}{\zeta_u}, \quad (2.17)$$

Bu - критерий Бутакова-Нейкова, вычисляемый по формуле

$$Bu = \frac{2Ke}{\zeta_u (1-n^2)},$$

ζ_u - сумма к.м.с. загрузочной трубы

$$\zeta_u = \zeta_{un} + \zeta_{uk}.$$

Число Эйлера, в силу (2.13) и (2.14), выражается через к.м.с. неплотностей верхнего укрытия (ζ_1^*) и перегородки приёмной камеры (ζ_p^*), отнесённых к скорости эжектируемого воздушного потока u_c

² Здесь и далее вместо квадрата скорости принята форма записи $u|u|$, обеспечивающая расширение области применения уравнений на область отрицательных значений скорости

$$\text{Eu} = \frac{\zeta_n^* z_c |z_c| + p_y}{\zeta_u}, \quad (2.18)$$

где

$$z_c = u_c - r\omega_c, \quad (2.19)$$

$$\zeta_n^* = \zeta_1^* + \zeta_p^*.$$

Из уравнения (2.4) при $\omega = \omega_c$, $dp_\omega = 0$, с учётом краевых условий для давлений, следует равенство:

$$p_2 - p_1 = \zeta_\omega \omega_c |\omega_c|,$$

ζ_ω - сумма к.м.с. байпасной камеры

$$\zeta_\omega = \zeta_{\omega n} + \zeta_{\omega k}.$$

Тогда критерий Эйлера (2.17) выражается через скорость восходящего воздушного потока ω_c

$$\text{Eu} = \frac{\zeta_\omega}{\zeta_u} \omega_c |\omega_c|. \quad (2.20)$$

С учётом этого результата уравнение (2.16) преобразуется к виду:

$$\frac{\zeta_\omega}{\zeta_u} \omega_c |\omega_c| + u_c |u_c| = \text{Bu} \frac{|1 - u_c|^3 - |n - u_c|^3}{3}.$$

Это уравнение решается с учётом (2.19) и уравнения

$$\frac{\zeta_\omega}{\zeta_n} \omega_c |\omega_c| = \zeta_n^* z_c |z_c| + p_y,$$

которое следует из сопоставления правых частей выражений (2.18) и (2.20).

Тогда уравнение для определения параметра z_c , скорости воздушного эжектируемого потока в трубе u_c и скорости восходящего воздушного потока в байпасной камере ω_c имеет вид:

$$\frac{f}{\zeta_u} + F |F| = \text{Bu} \frac{|1 - F|^3 - |n - F|^3}{3}, \quad (2.21)$$

$$u_c = F; \quad \omega_c = \frac{f}{\sqrt{\zeta_\omega |f|}}, \quad (2.22)$$

где введены функции параметра z_c :

$$f = \zeta_n^* z_c |z_c| + p_y, F = z_c + \frac{rf}{\sqrt{\zeta_\omega |f|}}.$$

После определения из уравнения (2.21) величины z_c , расход воздушного потока \tilde{Q}_1 ($\text{м}^3/\text{с}$), поступающего в нижнее укрытие, вследствие увлечения воздуха сыпучим материалом и разрежения в укрытии, вычисляется по формуле:

$$\tilde{Q}_1 = z_c \tilde{v}_k \tilde{S}_u,$$

расход рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере:

$$\tilde{Q}_R = \omega_c \tilde{v}_k \tilde{S}_\omega$$

расход воздушного потока \tilde{Q}_u ($\text{м}^3/\text{с}$), поступающего из загрузочной трубы во внутреннюю камеру:

$$\tilde{Q}_u = u_c \tilde{v}_k \tilde{S}_u.$$

В случае изотермических условий должен соблюдаться баланс найденных расходов:

$$Q_R + Q_1 = Q_u.$$

Расход воздушного потока, поступающего из трубы в нижнее укрытие при перекрытии торцевых отверстий байпасной камеры ($\tilde{Q}_R = 0$) определяется следующим образом. Решается уравнение (2.16) с учётом равенства $u_c = u_0 = z_c$:

$$\text{Eu}_0 + u_0 |u_0| = \text{Bu} \frac{|1 - u_0|^3 - |n - u_0|^3}{3}, \quad (2.23)$$

где Eu_0 в силу (2.18)

$$Eu_0 = \frac{\zeta_n^* u_0^2 + p_y}{\zeta_u}.$$

Из уравнения (2.23) определяется безразмерная скорость эжектируемого воздушного потока u_0 , а затем и искомый расход воздуха

$$Q_0 = u_0 \tilde{v}_k \tilde{S}_u,$$

поступающий из трубы в нижнее укрытие при перекрытии байпасной камеры.

Как показали расчёты на примере узла перегрузки (рисунок 2.2, 2.3), расход этого воздушного потока значительно выше в сравнении с перегрузкой по трубе с байпасной камерой, малым аэродинамическим сопротивлением ($\zeta_w < 2$) и площадью всех неплотностей верхнего укрытия ($f_1 < 0.2 \text{ м}^2$). При больших числах эжекции ($Ke > 5$) это особенно заметно. С увеличением числа эжекции Ke изменяется величина коэффициента рециркуляции R_z (рисунок 2.3) от -1 до положительных величин при $Ke \geq 3$.

Отрицательные величины R_z при небольших величинах Ke объясняются тем, что байпасная камера становится параллельным воздуховодом. В нижнем укрытии наблюдается значительное разрежение ($p_3 \leq -10$). Поток сыпучего материала обладает малой эжектирующей способностью. Из верхнего укрытия воздушный поток поступает в приёмную камеру и наблюдается «отрицательная рециркуляция» ($\omega_c < 0, q < 1$).

Увеличивая аэродинамическое сопротивление ζ_n^* и уменьшая площади неплотностей f_1 и f_p (рисунок 2.4) отрицательной рециркуляции можно избежать.

Заметно влияние герметизации верхнего укрытия, а также использование приёмной камеры с малыми зазорами для прохода материала. При отсутствии данной камеры «положительная» рециркуляция воздуха возможна только тогда, когда верхнее укрытие имеет разрежение выше, чем разрежение в нижнем укрытии, при хорошей герметизации.

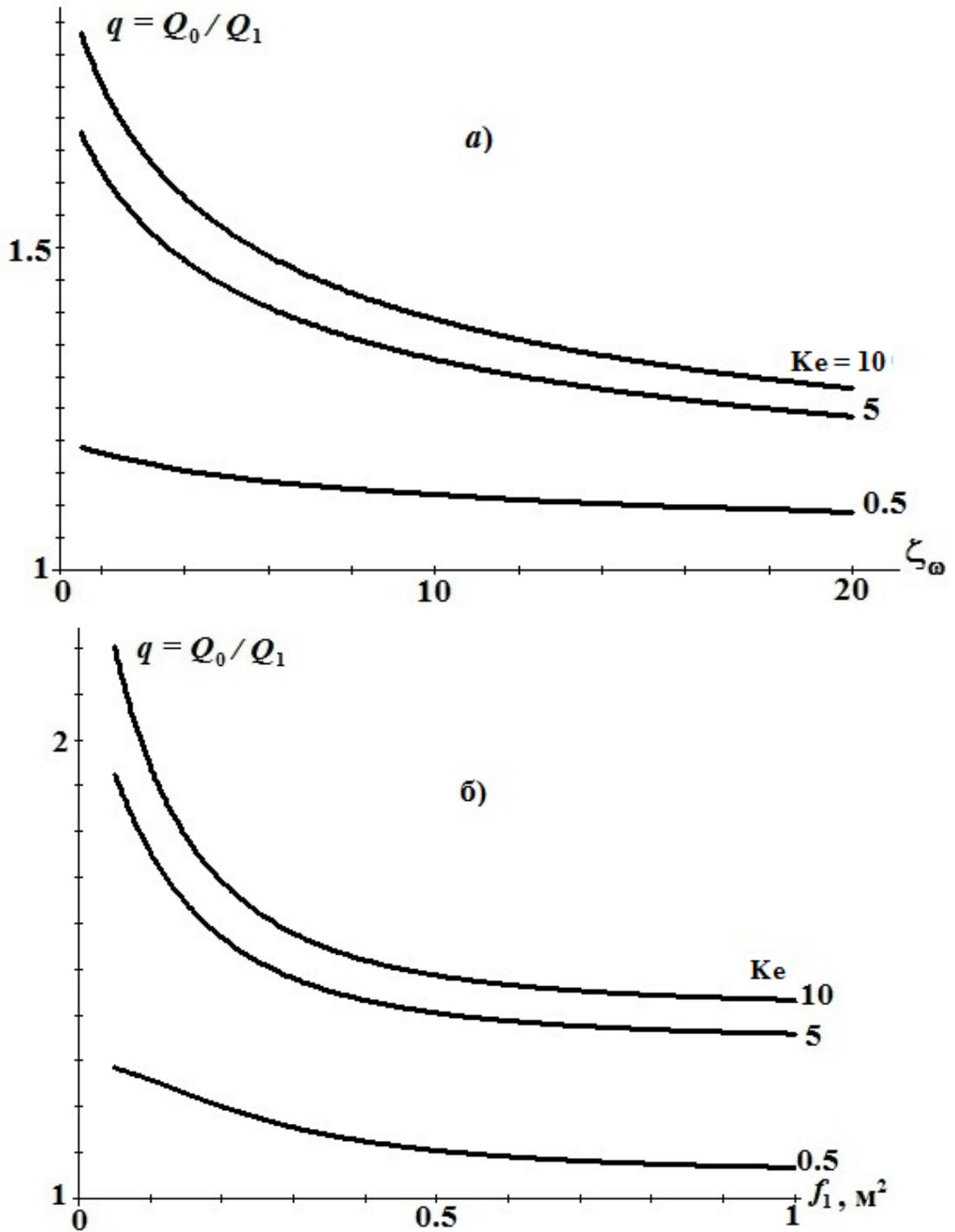


Рисунок 2.2 – Изменение относительного расхода воздушного потока, увлекаемого в нижнее укрытие сыпучим материалом в зависимости от к.м.с. байпасного канала ζ_ω и площадей всех неплотностей f_1 при $v_0 = 3 \text{ м/с}$; $v_k = 10 \text{ м/с}$; $P_3 = -10 \text{ Па}$; Q_1 - при наличии байпасной камеры;

Q_0 - при $\zeta_\omega \rightarrow \infty$ (при её отсутствии): а) при $S_u = S_\omega = 0.3 \text{ м}^2$; $f_1 = f_p = 0.3 \text{ м}^2$; $\zeta_u = 1.5$;

$\zeta_1 = \zeta_p = 2.4$; б) при $S_u = S_\omega = 0.3 \text{ м}^2$; $f_p = 0.3 \text{ м}^2$; $\zeta_u = 1.5$; $\zeta_\omega = 4$; $\zeta_1 = \zeta_p = 2.4$

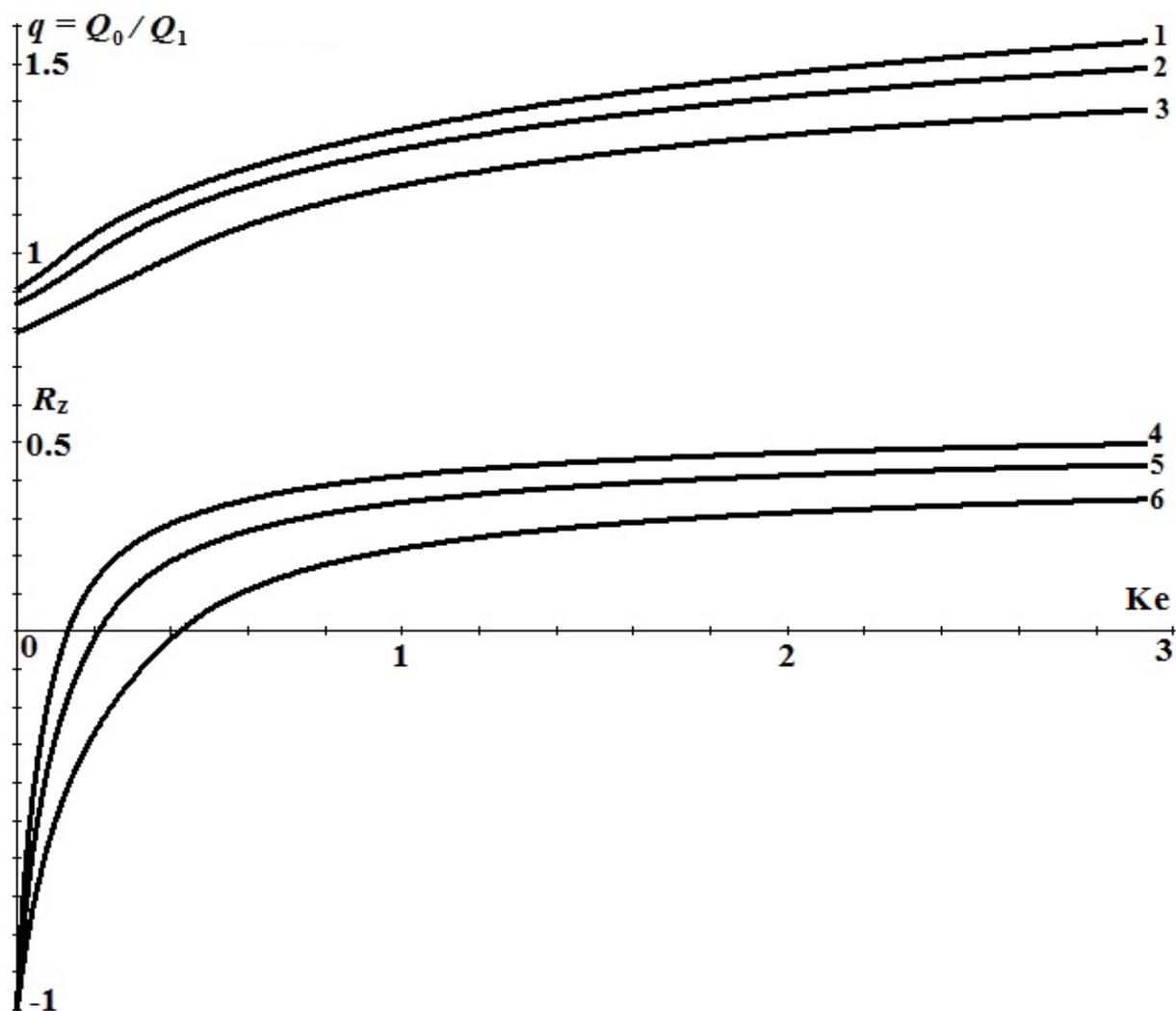


Рисунок 2.3 – Изменение соотношения $q = Q_0 / Q_1$ и коэффициента рециркуляции в зависимости от числа эжекции Ke (при $S_u = S_\omega = 0.3 \text{ м}^2$; $f_1 = f_p = 0.3 \text{ м}^2$; $v_k = 10 \text{ м/с}$; $\zeta_1 = \zeta_p = 2.4$; $n = 0.3$; разрежения в нижнем укрытии $P_3 = -10 \text{ Па}$): 1 - q при $\zeta_u = \zeta_\omega = 1.5$; 2 - q при $\zeta_u = \zeta_\omega = 2.4$; 3 - q при $\zeta_u = \zeta_\omega = 4.8$; 4 - R_z при $\zeta_u = \zeta_\omega = 1.5$; 5 - R_z при $\zeta_u = \zeta_\omega = 2.4$; 6 - R_z при $\zeta_u = \zeta_\omega = 4.8$

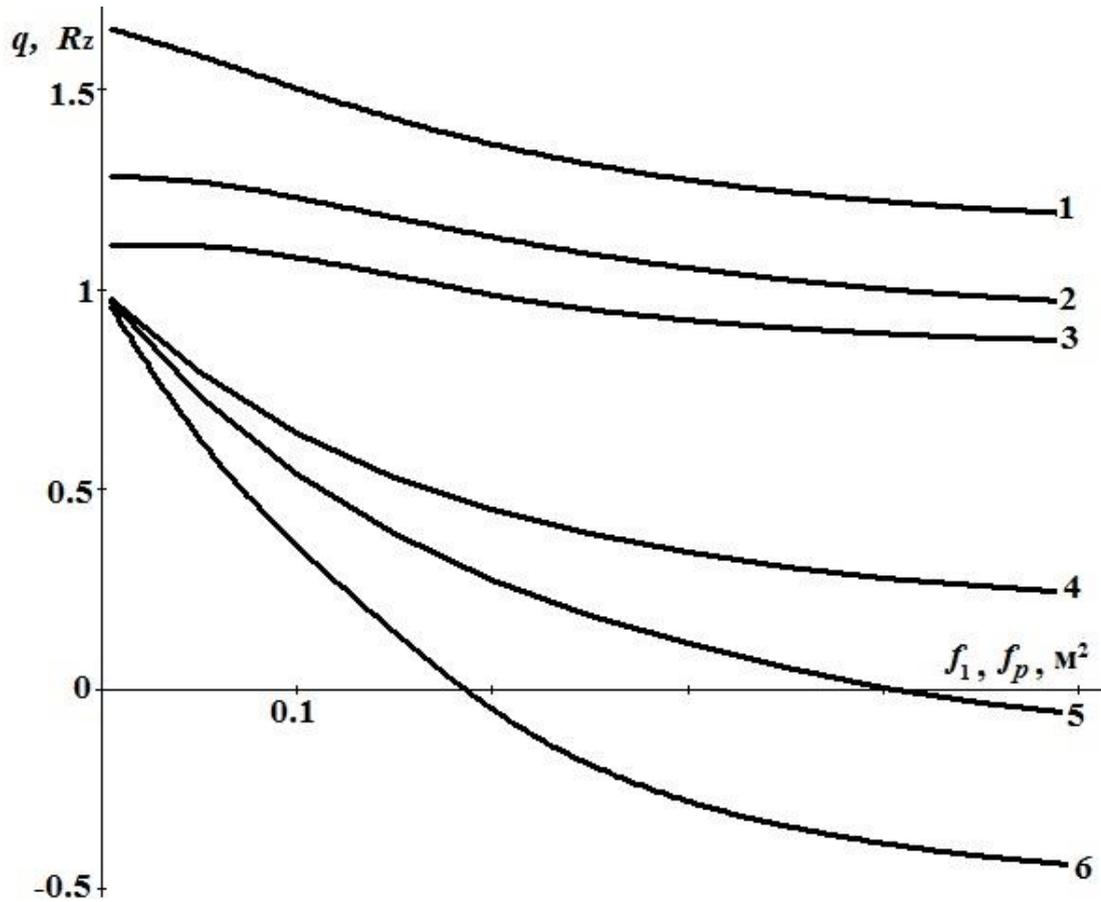


Рисунок 2.4 – Изменение отношения $q = Q_0 / Q_1$ и коэффициента рециркуляции R_z в зависимости от величины f_1 ($f_p = 0.3 \text{ м}^2$) или от площади f_p ($f_1 = 0.3 \text{ м}^2$) при $S_u = S_\omega = 0.3 \text{ м}^2$; $\zeta_1 = \zeta_p = \zeta_u = \zeta_\omega = 2.4$; $v_k = 10 \text{ м/с}$; $n = 0.3$; $P_3 = -10 \text{ Па}$: 1 - q , $Ke = 1.0$; 2 - q , $Ke = 0.3$; 3 - q , $Ke = 0.1$; 4 - R_z , $Ke = 1.0$; 5 - R_z , $Ke = 0.3$; 6 - R_z , $Ke = 0.1$

2.3. Комбинированное байпасирование

В этом параграфе рассматривается рециркуляция воздушного потока с двумя кольцами циркуляции.

Линеаризация исходных уравнений (2.4) и (2.5), осуществляется следующим образом:

$$udu \approx \bar{u}du;$$

$$\omega d\omega \approx \bar{\omega}d\omega.$$

Данное достаточно грубое упрощение не приводит к значительным погрешностям. Получаемые результаты близки к "точным" решениям исходной системы уравнений. Это связано с тем, что при движении воздуха в данных каналах потери давления определяются главным образом местными потерями, а не изменением величины скоростного давления.

Здесь также используется линейный закон изменения сил межкомпонентного взаимодействия при движении потока сыпучего материала:

$$Ke \cdot \frac{|v-u|(v-u)}{v} \approx Ke \cdot k(v-u) \quad (2.24)$$

$$k = \left| 1 - \frac{u}{v} \right| \approx 1 - \frac{\bar{u}}{\bar{v}}.$$

Для упрощения правой части линейного уравнения, равноускоренный поток материала заменяется на условный (ускоренный) поток, скорость которого рассчитывается из выражения:

$$\bar{v} = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 / 2,$$

а усреднённая скорость падения потока частиц по формуле:

$$\bar{v} = b_0 + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{6},$$

где $b_0 = n$; $b_1 = \sqrt{8(1+n^2)} - 3n - 1$; $b_2 = 4(1+n - \sqrt{2(1+n^2)})$.

Предполагается, что потери давления в отверстиях перфорации стенок трубы зависят линейно от скорости:

$$p_w - p_u = \zeta_0 \overline{|w|} w,$$

где $\overline{|w|}$ - усреднённая величина скорости воздуха, перетекаемого в отверстиях; ζ_0 - к.м.с. отверстия (обычно $\zeta_0 = 2.4$ - отверстие в тонкой стенке). Последнее соотношение с учётом (2.6) принимает вид:

$$p_{\omega} - p_u = \frac{|\bar{w}|\sqrt{\zeta_0}}{E} \frac{du}{dx}. \quad (2.25)$$

С учётом упрощений исходные уравнения (2.4), (2.5), и соотношения между скоростями (2.2)

$$\omega = \frac{u - z}{r}; \quad \bar{\omega} = \frac{\bar{u} - z}{r},$$

имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_{\omega}}{dx} + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} \frac{du}{dx} = 0; \\ \frac{dp_u}{dx} + 4\bar{u} \frac{du}{dx} = k\text{Ke}(v - u). \end{cases} \quad (2.26)$$

При вычитании из первого уравнения второго получается уравнение:

$$\frac{d(p_{\omega} - p_u)}{dx} - 4 \left(\bar{u} - \frac{\bar{u} - z}{r^2} \right) \frac{du}{dx} + k\text{Ke} \cdot u = k\text{Ke} \cdot v,$$

которое, с учётом (2.25), сводится к линейному дифференциальному уравнению второго порядка, имеющего постоянные коэффициенты:

$$A = 2 \left(\bar{u} - \frac{\bar{u} - z}{r^2} \right) \frac{E}{|\bar{w}|\sqrt{\zeta_0}}; \quad (2.27)$$

$$B = k \frac{\text{Ke} \cdot E}{|\bar{w}|\sqrt{\zeta_0}}.$$

Общая задача комбинированного байпасирования перфорированной трубы узла перегрузки сводится к решению системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} u'' - 2Au' - Bu = -Bv; \\ dp_{\omega} + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} dw = 0. \end{cases} \quad (2.28)$$

при краевых условиях (2.7) - (2.12).

Решение первого уравнения имеет вид:

$$u = C_1 e^{a_1 x} + C_2 e^{a_2 x} + v - k_1 - k_2 x, \quad (2.29)$$

$$u' = C_1 a_1 e^{a_1 x} + C_2 a_2 e^{a_2 x} + b_1 + b_2 x - k_2, \quad (2.30)$$

где

$$k_2 = 2b_2 \frac{A}{B}; \quad k_1 = 2 \frac{A}{B} (b_1 - k_2) - b_2 / B;$$

$$a_1 = A + \sqrt{A^2 + B}; \quad a_2 = A - \sqrt{A^2 + B}.$$

Из краевых условий для скорости (2.7) и (2.9) определяются константы интегрирования C_1 и C_2 :

$$\begin{cases} u_n = C_1 + C_2 + n - k_1, \\ u_k = C_1 e^{a_1} + C_2 e^{a_2} + 1 - k_1 - k_2. \end{cases}$$

Следовательно:

$$C_1 = \frac{m_2 - m_1 e^{a_2}}{e^{a_1} - e^{a_2}}; \quad C_2 = \frac{m_1 e^{a_1} - m_2}{e^{a_1} - e^{a_2}},$$

где

$$m_1 = u_n - n + k_1; \quad m_2 = u_k - 1 + k_1 + k_2.$$

Из уравнения (2.25) с учётом (2.29) следует соотношение:

$$p_\omega - p_u = \frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 e^{a_1 x} + C_2 a_2 e^{a_2 x} + b_1 + b_2 x - k_2),$$

из которого и первых уравнений для давлений (2.11) и (2.12) выводится система равенств:

$$\begin{cases} \zeta_{on} \frac{(u_n - z)^2}{r^2} + \zeta_{un} u_n^2 = \frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 + C_2 a_2 + b_1 - k_2); \\ \zeta_{ok} \frac{(u_k - z)^2}{r^2} + \zeta_{uk} u_k^2 = -\frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 e^{a_1} + C_2 a_2 e^{a_2} + b_1 - k_2 + b_2). \end{cases} \quad (2.31)$$

Для замыкания этой системы двух уравнений с неизвестными u_n, u_k и z использовано второе дифференциальное уравнение системы (2.28). При интегрировании этого уравнения по всей длине каналов выводится соотношение:

$$p_{\omega}(1) - p_{\omega}(0) + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} (u_k - u_n) = 0,$$

которое с учётом вторых уравнений для давлений (2.11) и (2.12), соотношений (2.13) и (2.14), позволяет получить искомое третье уравнение

$$p_y + \zeta_n^* z^2 + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} (u_k - u_n) = \zeta_{\omega k} \frac{(u_k - z)^2}{r^2} + \zeta_{\omega n} \frac{(u_n - z)^2}{r^2} = 0; \quad (2.32)$$

$$\zeta_{n1}^* = \zeta_1^* + \zeta_p^* = \zeta_1 \left(\frac{\tilde{S}_u}{\tilde{f}_1} \right)^2 + \zeta_p \left(\frac{\tilde{S}_u}{\tilde{f}_p} \right)^2,$$

которое замыкает систему (2.31).

Для решения полученной системы уравнений (2.32) - (2.31) необходимо определить осреднённые скорости воздушных потоков: эжектируемого (\bar{u}), рециркулируемого ($\bar{\omega}$) и перетекающего через отверстия перфорации $|\bar{w}|$. Для вычисления осреднённой скорости эжектируемого воздушного потока \bar{u} выполнено интегрирование второго уравнения системы (2.26) по длине трубы:

$$p_u(1) - p_u(0) + 4\bar{u}(u_k - u_n) = \text{Ke}(\bar{v} - \bar{u})^2 / \bar{v}$$

или с учётом краевых условий для давлений

$$\zeta_{uk} u_k^2 + \zeta_{un} u_n^2 + \zeta_n^* z^2 + p_y + 4\bar{u}(u_k - u_n) = \text{Ke} \frac{(\bar{v} - \bar{u})^2}{\bar{v}},$$

откуда определяется соотношение для z :

$$z = \sqrt{\frac{k \text{Ke}(\bar{v} - \bar{u}) - F_y}{\zeta_n^*}}, \quad (2.33)$$

где

$$F_y = \zeta_{uk} u_k^2 + \zeta_{un} u_n^2 + p_y + 4\bar{u}(u_k - u_n).$$

В качестве первого приближения полагалось:

$$\bar{u} = u_c, \quad \bar{\omega} = \omega_c,$$

где u_c и ω_c рассчитываются из уравнения (2.22) после определения из уравнения (2.21) параметра z_c .

Осреднение величины скорости перетекания воздуха $|\overline{w}|$ осуществлено по его значению в трёх точках по длине трубы. Скорость w знакопеременна. Поэтому

$$|\overline{w}| \approx \frac{|w(0)| + |w(1)|}{3},$$

где из краевых условий (2.8) - (2.10), (2.11) - (2.12) и (2.2) следует:

$$|w(0)| = \sqrt{\frac{\zeta_{\omega n}}{\zeta_0} \left(\frac{u_n - z}{r} \right)^2 + \frac{\zeta_{\omega m}}{\zeta_0} u_n^2}; |w(1)| = \sqrt{\frac{\zeta_{\omega k}}{\zeta_0} \left(\frac{u_k - z}{r} \right)^2 + \frac{\zeta_{\omega k}}{\zeta_0} u_k^2}.$$

Более простой вариант - решение системы (2.31) с подстановкой (2.33), где качестве первого приближения для усреднённой скорости \bar{u} используется среднеарифметическое значение скорости эжектируемого воздушного потока в трёх точках (при $x = 0$; $x = x_m$ и $x = 1$):

$$\bar{u} = \frac{u_n + u_m + u_k}{3}, \quad (2.34)$$

где $u_m \approx u_c$.

После определения u_n и u_k из системы (2.31), расчётная величина усреднённой скорости находится по формуле

$$\bar{u}_r = \bar{v} + \frac{C_1}{a_1} (e^{a_1} - 1) + \frac{C_2}{a_2} (e^{a_2} - 1) - k_1 - 0.5k_2, \quad (2.35)$$

которая получена путём интегрирования функции (2.28) на интервале $0 \leq x \leq 1$.

Эти величины можно сопоставить при следующем приближении:

$$\bar{u} \approx \bar{u}_r \quad (2.36)$$

или найти максимальное значение u_m из решения системы (2.29) - (2.30) (при $u = u_m$; $x = x_m$; $u' = 0$), затем определить \bar{u} из формулы (2.34). Был использован метод последовательных приближений и соотношения (2.35) и (2.36).

Результаты вычислений на примере узла перегрузки показали, что при комбинированном байпасировании расход рециркулируемого воздушного потока растёт, расход воздушного потока, нагнетаемого из приёмной камеры в нижнее аспирируемое укрытие уменьшается (рисунок 2.5). Это заметно при сравнении графиков изменения коэффициентов рециркуляции R_{z1} , R_{z2} , а также расходов нагнетаемого воздуха Q_1 и Q_2 . С ростом эжектирующей способности потока сыпучего материала, т.е. числа эжекции Ke , данное отличие более заметно. При отсутствии байпасирования и $Ke=0.6$, расход эжектируемого воздуха составил $Q_0 = 0.66 \text{ м}^3/\text{с}$, только при торцевом перетекании воздуха этот расход снизился на 26% до $Q_1 = 0.49 \text{ м}^3/\text{с}$, а при комбинированном байпасировании на 44% до $Q_2 = 0.37 \text{ м}^3/\text{с}$.

При $Ke=3$ эти величины составят $Q_0 = 1.03 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_1 = 0.6 \text{ м}^3/\text{с}$ (на 42% меньше); $Q_2 = 0.24 \text{ м}^3/\text{с}$ (меньше на 77% по сравнению с Q_0). Существенное снижение расхода Q_1 , а, следовательно, и расхода аспирируемого воздуха Q_a , объясняется увеличением противодавлений (рисунок 2.6) в укрытиях при росте числа Ke . Увеличивается разрежение $p_{1(1)}$ в верхнем укрытии и снижается разрежение в полости нижнего укрытия $p_{2(1)}$. Это влечёт рост расхода рециркулируемого воздуха при возрастании величины $\Delta p_{21(1)}$. При комбинированном байпасировании интенсивность рециркуляции воздуха увеличивается, за счет течения воздуха через отверстия загрузочной трубы, при возрастании числа эжекции Ke . Возрастают избыточные давления в трубе $p_u(0)$ (рисунок 2.7), байпасной камере $p_w(0)$, величине разности давлений $\delta p(0)$, $\delta p(1)$, что приводит к увеличению расхода рециркулируемого течения воздуха.

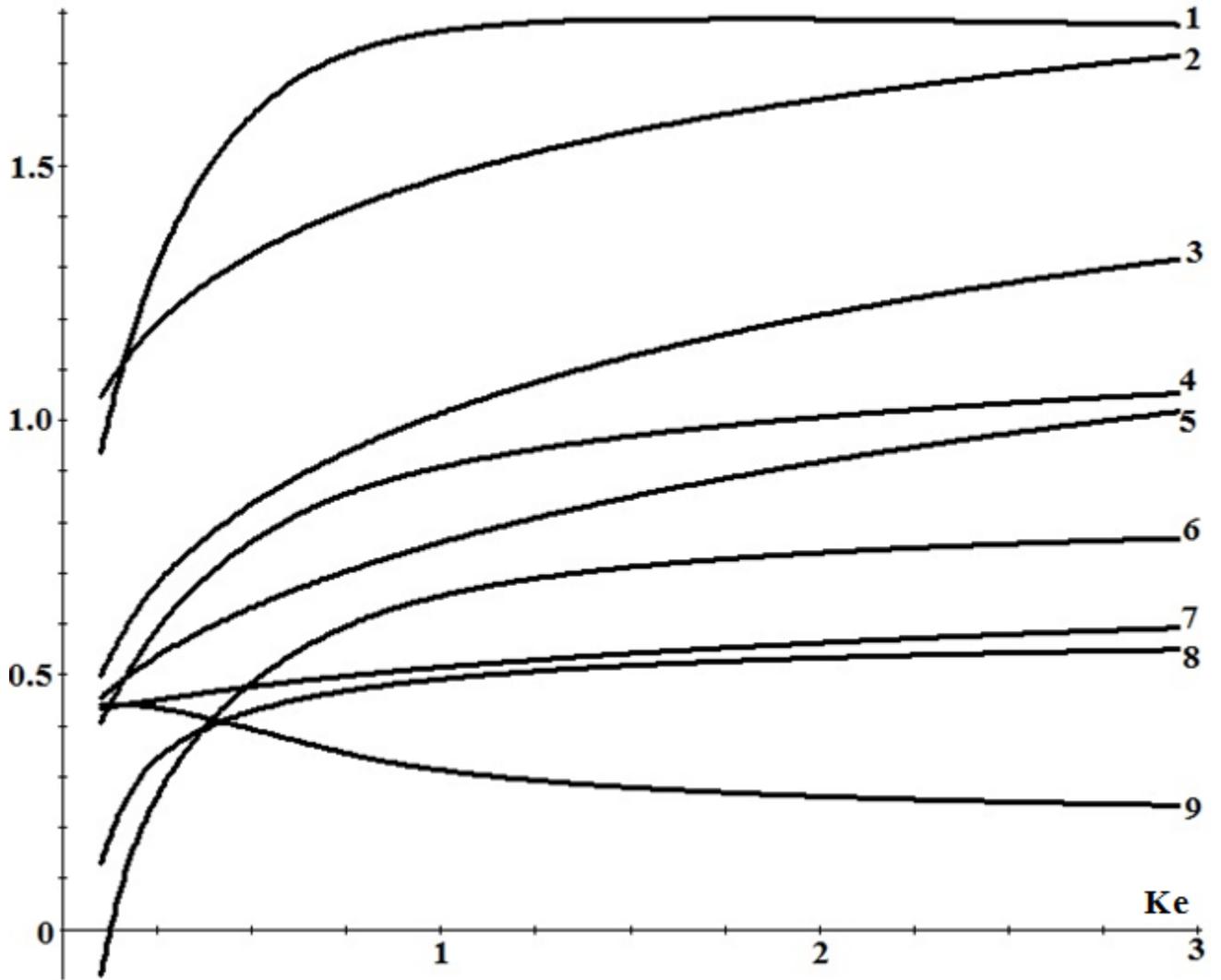


Рисунок 2.5 – Изменение расхода воздуха, увлекаемого сыпучим материалом в нижнее укрытие из приёмной камеры при торцевом перетекании воздуха Q_1 , при комбинированном байпасировании Q_2 и при его отсутствии Q_0 ; суммарного расхода эжектируемого и рециркулируемого воздуха Q_{u1} при торцевом перетекании воздуха, Q_{u2} при комбинированном байпасировании; отношение расходов $q_0 = Q_0 / Q_1$, $q_{02} = Q_{u2} / Q_1$, коэффициентов рециркуляции $R_{z1} = (Q_{u1} - Q_1) / Q_{u1}$; $R_{z2} = (Q_{u2} - Q_2) / Q_{u2}$ в зависимости от числа эжекции Ke : 1 - q_2 ; 2 - q_0 ; 3 - Q_{u1} ; 4 - Q_{u2} ; 5 - Q_0 ; 6 - R_{z2} ; 7 - Q_1 ; 8 - R_{z1} ; 9 - Q_2

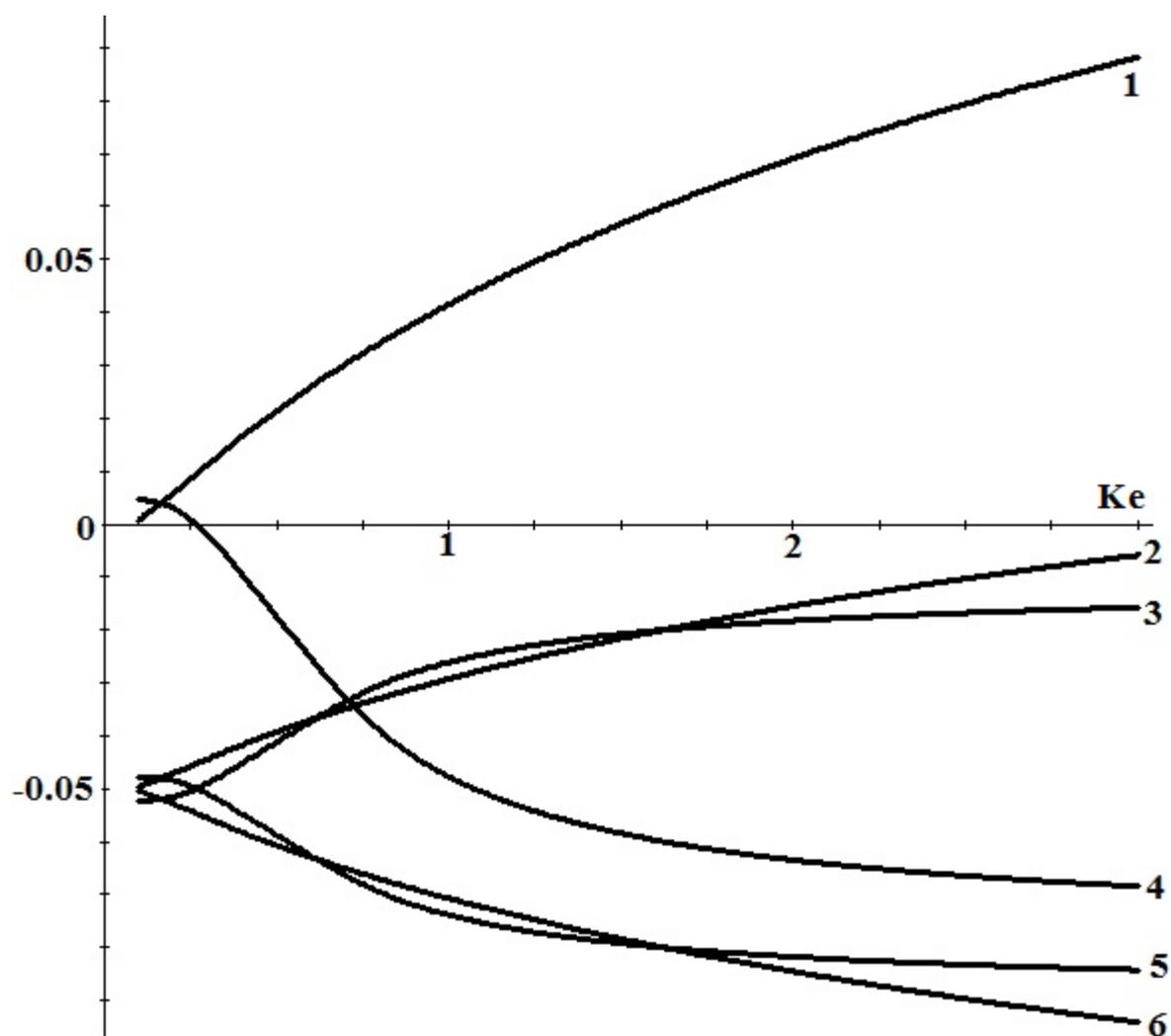


Рисунок 2.6 – Графики изменения избыточных статических давлений в верхнем укрытии $p_{1(1)}$ - при торцевом перетекании воздуха и $p_{1(2)}$ - при комбинированном байпасировании, а также в приёмной камере нижнего укрытия $p_{2(1)}$ при торцевом перетекании воздуха и $p_{2(2)}$ при комбинированном байпасировании, разности давлений $\Delta p_{21(1)} = p_{2(1)} - p_{1(1)}$; $\Delta p_{21(2)} = p_{2(2)} - p_{1(2)}$ в зависимости от числа эжекции Ke (при данных рисунка 2.5): 1 - $\Delta p_{21(1)}$; 2 - $p_{2(1)}$; 3 - $p_{1(2)}$; 4 - $\Delta p_{21(2)}$; 5 - $p_{2(2)}$; 6 - $p_{1(1)}$

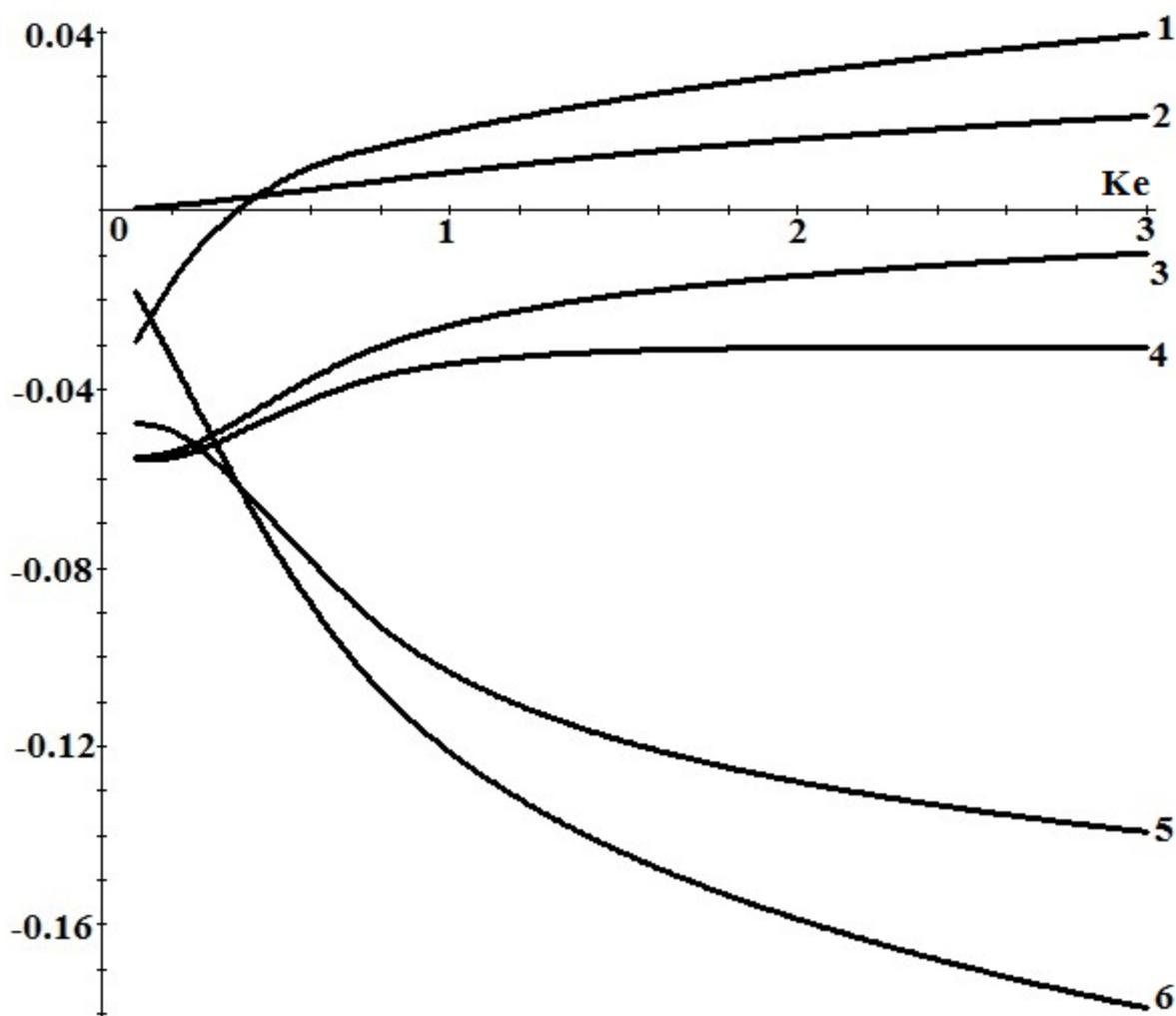


Рисунок 2.7 – Графики изменения избыточных статических давлений на концах трубы: $p_u(0)$ (кривая 4) - при входе эжектируемого воздушного потока в трубу, $p_u(1)$ (кривая 1) - при выходе его из трубы; на концах камеры байпасирования: $p_w(0)$ (кривая 3) - при выходе воздуха из этой камеры в верхнее укрытие, $p_w(1)$ (кривая 5) - при входе в укрытие, разность давлений $\delta p(0) = p_w(0) - p_u(0)$ (кривая 2) и $\delta p(1) = p_w(1) - p_u(1)$ (кривая 6) в зависимости от числа эжекции Ke (при данных рисунка 2.5)

При возрастании числа эжекции Ke растут продольные скорости рециркулируемого, эжектируемого (рисунок 2.8) и перетекаемого воздуха (рисунок 2.9).

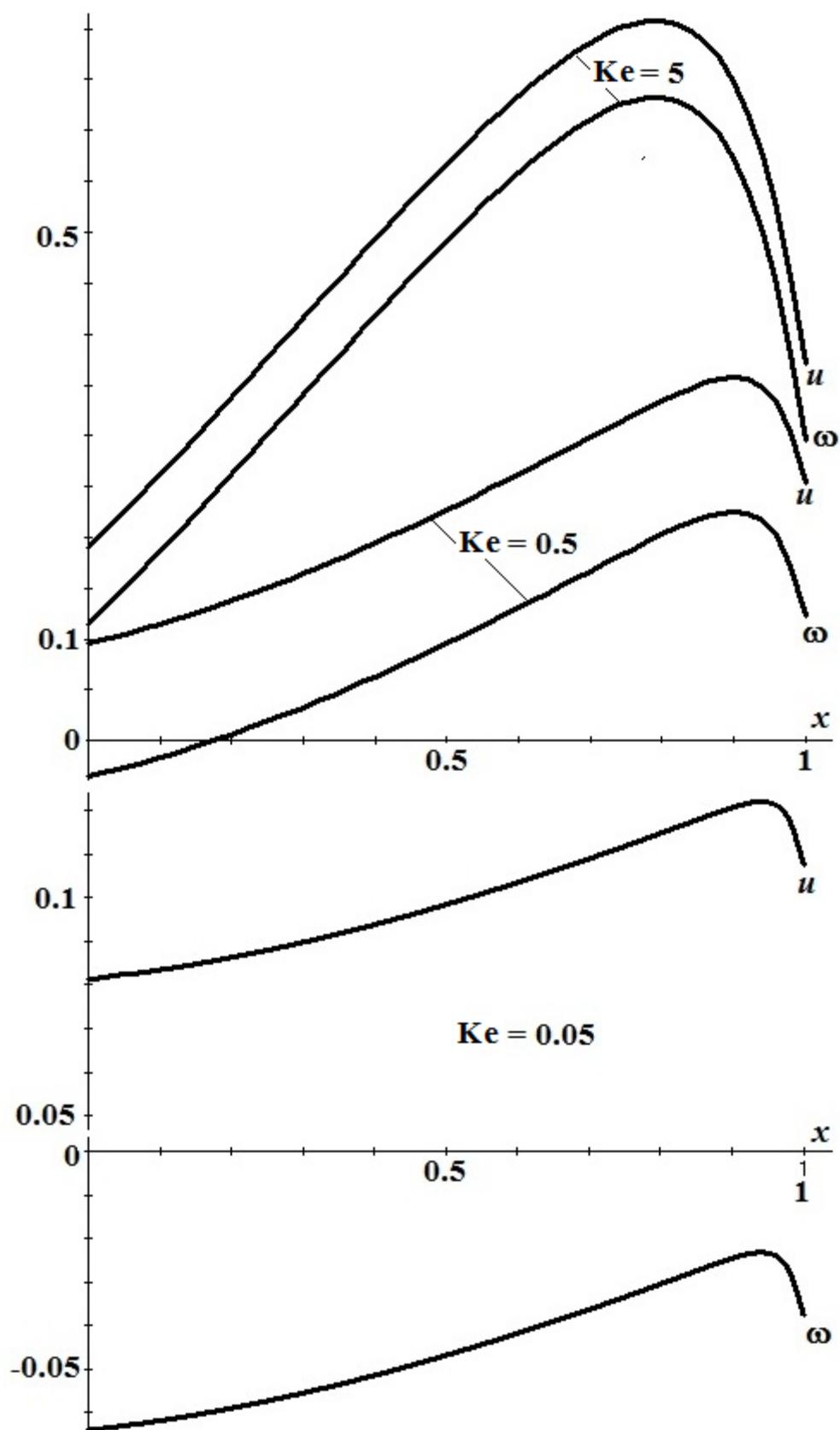


Рисунок 2.8 – Изменение скоростей эжектируемого и рециркулируемого воздушных потоков в байпасном канале при удалении от начала системы координат (при данных рисунка 2.5).

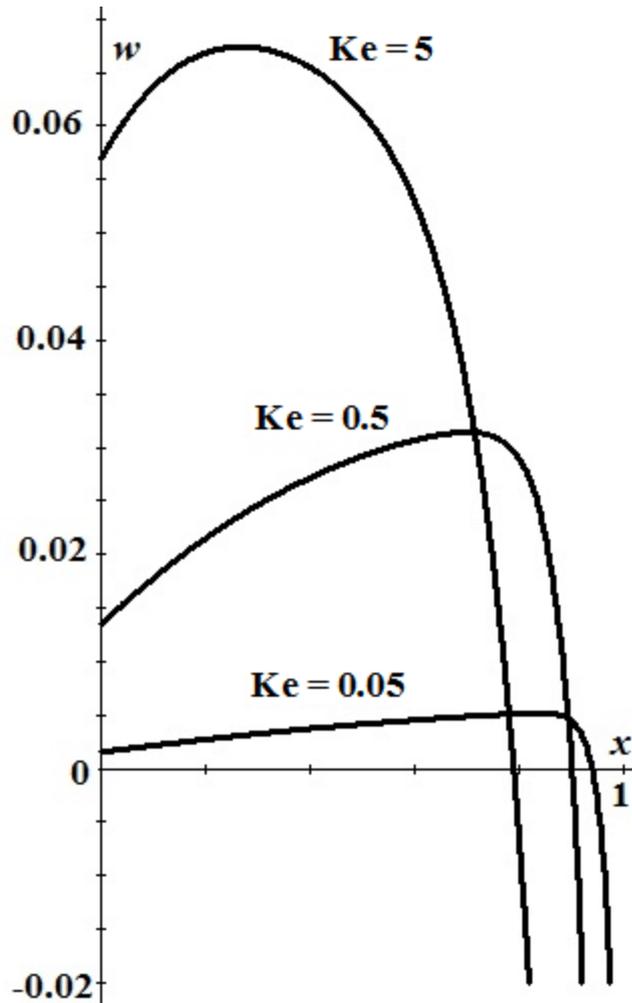


Рисунок 2.9 – Изменение скорости перетекания рециркулируемого воздуха через отверстия перфорации по высоте трубы (при данных рисунка 2.5).

Существенное влияние на снижение расхода нагнетаемого воздуха Q_1 оказывает герметизация верхнего укрытия (в этом случае увеличивается p_1) и снижение площадей зазоров между лентой конвейера и стенками приёмной камеры (растёт p_2).

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. На основе дифференциальных уравнений эжектируемого воздуха в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала, и рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере,

разработана математическая модель комбинированной рециркуляции воздуха через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры. Путём решения дифференциальных уравнений выявлены закономерности снижения объёмов эжекции за счет рециркуляции воздуха.

2. Теоретически доказано, что организация рециркуляции воздушных потоков при комбинированном байпасировании снижает расход воздуха, увлекаемого потоком сыпучих материалов в нижнее укрытие (приёмную ёмкость), а значит, снижается расход отсасываемого воздуха, что приводит к снижению энергозатрат на эксплуатацию систем вентиляции.

Определены параметры, обеспечивающие снижение объёмов эжекции за счет организации рециркуляционных течений воздуха. Показано, что при небольших числах эжекции ($Ke = 0.6$), только при торцевом перетекании воздуха, расход нагнетаемого в укрытие воздуха снижается в 1,35 раза относительно случая перегрузки материала в трубе с непроницаемыми стенками, а при комбинированном байпасировании - в 1,78 раза. При увеличении числа эжекции до трёх наблюдается большее снижение расхода эжектируемого воздуха. При торцевом перетекании воздуха этот расход уменьшается в 1,72 раза, а при комбинированном байпасировании - в 4,29 раза.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА НА СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ЭЖЕКТИРУЕМОГО ВОЗДУХА

3.1. Цель и задачи экспериментального исследования

Аспирационное укрытие представляет собой устройство для локализации источника пылеобразования, исключающее возможность попадания пыли в рабочую зону помещения, за счет создания в нем разрежения местным отсосом. Количество аспирируемого воздуха на прямую зависит от объемов эжектируемого воздуха, поступающего в полость укрытия по загрузочной трубе. Проведя анализ имеющихся способов минимизации объемов количества эжектируемого воздуха, было установлено, что использование цилиндрической байпасной камеры может существенно повлиять на количество удаляемого из укрытия воздуха. В частности, нанесение перфорации на загрузочную трубу может способствовать снижению объемов удаляемого воздуха. Для выявления конструктивных параметров, которые влияют на снижение эжекции воздуха, были спланированы [130, 131] и проведены исследования. Целью эксперимента является исследование процесса рециркуляции воздуха в цилиндрической байпасной камере с перфорированной загрузочной трубой.

Были разработаны экспериментальные установки для проведения исследований.

Поставлены следующие задачи:

- разработать методику проведения испытаний;
- экспериментально определить оптимальные параметры байпасирования при которых рециркуляция будет эффективно влиять на количество удаляемого воздуха;
- экспериментально исследовать циркуляцию воздуха в байпасной камере при наличии перфорации;
- экспериментально определить область нанесения перфорации.

Измеряемые параметры в процессе проведения эксперимента:

- скорость воздуха в байпасной камере (определение расхода циркулирующего воздуха);
- скорость воздуха в вытяжном патрубке (определение расхода удаляемого воздуха);
- статическое давление в приемной камере, байпасной камере, верхнем коробе (определение условий перетекания воздуха).

3.2. Исследование процесса рециркуляции воздуха в полости между круглой трубой и соосно-расположенной круглой байпасной камерой

3.2.1. Натурный эксперимент

Экспериментальная установка (рисунок 3.1) представляет собой приёмную камеру разработанного аспирационного укрытия. Она состоит из нижнего короба 1 из ДВП с одной стороной из прозрачного оргстекла, верхнего картонного короба 2, загрузочной трубы 3 из ПВХ, цилиндрического байпасного канала 4 из листа ПЭТ. Байпасная камера и загрузочная труба соединяют верхний и нижний короба. Загрузочная труба прикреплена к нижнему коробу шпилькой. Верхняя крышка нижнего короба имеет круглое отверстие, такого же диаметра, как и байпасная камера. Байпасная камера опирается в нижней части на шпильку. В верхней части байпасная камера и загрузочная труба соединены шпилькой, которая поддерживает загрузочную трубу соосно с байпасной камерой и не дает ей падать. Верхний короб одевается на байпасную камеру. В загрузочной трубе установлен осевой вентилятор 5, который имитирует поток эжектируемого воздуха. Щели на всех соединениях были герметизированы.

Процесс циркуляции воздушного потока в цилиндрическом байпасном канале исследовался при следующих размерах экспериментальной установки: приёмная камера с размерами 450 мм × 400 мм × 550 мм; параметры верхнего короба изменялись в зависимости от диаметра цилиндрической байпасной камеры

D_0 , которая имела размеры 150, 250, 300 мм; байпасный канал и загрузочная труба длиной 1200 мм; радиус загрузочной трубы $R_{з.тр} = 50$ мм; радиус канала: $R_0 = 75$ мм; 100 мм; 150 мм. Характеристики вентилятора: производительность $Q = 105$ м³/ч, давление $P = 35$ Па.

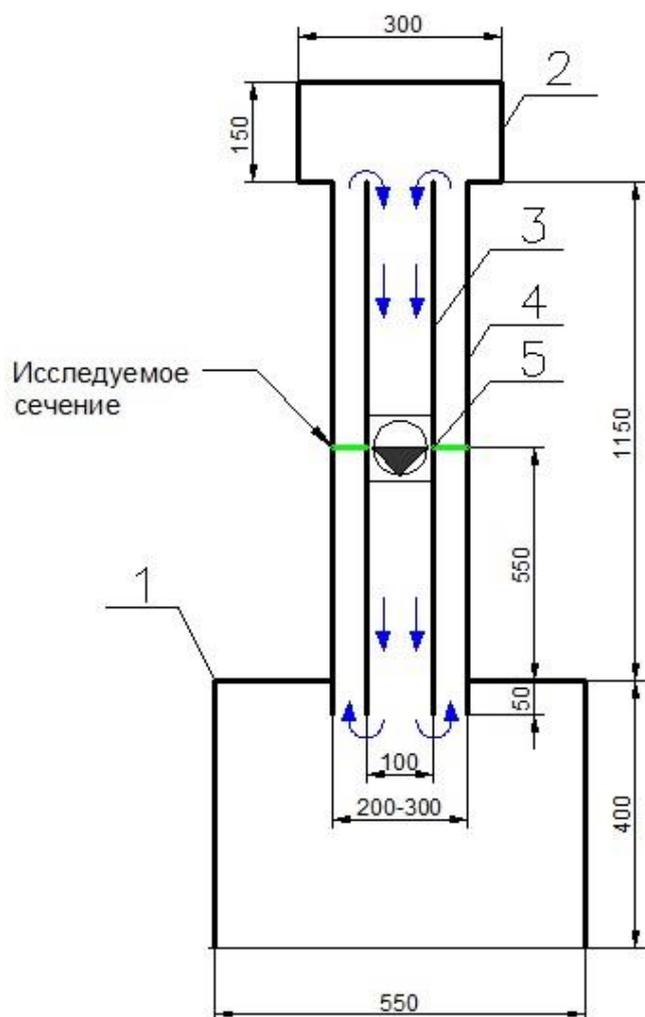


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки: 1 - приемная камера; 2 - верхний короб; 3 - загрузочная труба; 4 - байпасная камера; 5 - нагнетатель.

Наличие рециркуляции воздуха подтвердилось натурным экспериментом. Поток воздуха движется по загрузочной трубе вниз, а выходя из нее, меняет направление, поступает в байпасную камеру, направляется вверх, а затем всасывается в трубу.

Производились измерения значений статического давления $P_{ст}$ в приемной камере ($P_{ст_1^+}$), верхнем коробе ($P_{ст_2^-}$), в нижней и верхней части байпасной камере

(P_{cm_2} , P_{cm_3}) и скорости воздуха в каналах цилиндрической байпасной камеры (скорость рециркулируемого воздуха) v_{pec} и загрузочной трубы (скорость нагнетаемого воздуха) v_{mp} . Для определения скорости воздуха в сечениях загрузочной трубы и байпасной камеры использовался термоанемометр TESTO 425.

Измерения скорости в сечении загрузочной трубы проводилось путём погружения зонда прибора (установлен на конце телескопической трубки) в полость загрузочной трубы в выбранном сечении, на расстоянии 0,3 м от верхней крышки приёмной камеры. За счет того, что прибор имеет функцию замера показаний в течение времени и усреднения полученных данных в течение этого времени, были получены усредненные по времени значения скоростей воздуха в сечении загрузочной трубы. Проводилось 5 замеров в течение 30 секунд.

В ходе проведения измерений было установлено, что скорость воздуха по сечению неравномерна. В середине сечения наблюдались минимальные значения, а у внутренних стенок - максимальные. Связано это с тем, что используемый для имитационного моделирования осевой вентилятор «разбрасывает» воздух по внутренним стенкам загрузочной трубы. Несмотря на это измеренная скорость воздуха в сечении загрузочной трубы составила в среднем 4 м/с.

Скорость воздуха в загрузочной трубе определялась по формуле $v = 4Q / (\pi D_{з.мп}^2) = 3,7$ м/с, т.к. известны диаметр загрузочной трубы $D_{з.мп}$ и расход нагнетаемого воздуха Q .

Измерение избыточного и вакуумметрического давления (таблица 3.1) проводилось микроманометром ММН-240.

Далее введено обозначение $\eta = \frac{R_{\sigma}}{R_{mp}} = \frac{D_{\sigma}}{D_{mp}}$ - отношение радиуса байпасной камеры R_{σ} к радиусу загрузочной трубы R_{mp} . Измерения проводились в полости нижнего короба, в полости верхнего короба, в нижней и верхней точках

байпасной камеры на расстоянии 50 мм от краев байпасной камеры. Измерения давлений проводились при наклоне трубки микроманометра с коэффициентом $K = 0,2$.

Таблица 3.1

Экспериментальные значения давлений

η \ P , Па	$P_{cm_1^+}$	$P_{cm_2^-}$	$P_{cm_3^-}$	$P_{cm_4^-}$
1,5	4	9	9	9
2	≤ 2	2	2	2
3	≤ 1	1	1	1

Знак «+» и «-» в индексе означает избыточное и вакуумметрическое давление соответственно. Величины разрежения и напора, создаваемого осевым вентилятором в загрузочной трубе, составило 14 Па.

Измерения скорости воздуха в байпасной камере v_{pec} проводились в сечении, образуемом внутренними стенками байпасной камеры и наружными стенками загрузочной трубы (сечение кольца) на расстоянии 550 мм от нижнего короба. Измерения усредненных по времени значений скорости проводилось 7 раз в течение 60 секунд. Полученные 7 значений суммировались, и находилось среднее арифметическое скоростей, которое и принималось за среднюю скорость воздуха v_{pec} по сечению байпасной камеры.

3.2.2. Вычислительный эксперимент

Численный алгоритм решения задачи строился при помощи метода граничных (сингулярных) интегральных уравнений.

По граничной линии S области течения непрерывным образом сосредоточены «фиктивные» источники или стоки с неизвестной интенсивностью $q(\xi)$ (плотность источников или стоков, м/с). Значения этих

интенсивностей должно быть такое, что воздействие всех источников или стоков на точки граничной линии инициировало бы в них заданные граничные условия для проекции скорости на внешнюю нормаль.

Проекция скорости воздуха в точке x области течения на направление вектора \vec{n} определяется из формулы:

$$v_n(x) = \int_S F_2(x, \xi) q(\xi) dS(\xi), \quad (3.1)$$

где функция

$$F_2(x, \xi) = \frac{1}{2\pi} \frac{(x_1 - \xi_1)n_1 + (x_2 - \xi_2)n_2}{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2}$$

является величиной проекции скорости воздуха на направление единичного вектора $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ в точке $x(x_1, x_2)$, инициированной действием единичного источника в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$.

При известных величинах $q(\xi)$ формула (3.1) является решением задачи. Для определения неизвестных величин $q(\xi)$ внутренняя точка x устремляется к граничной точке x_0 по направлению внешней нормали. В этом случае выражение (3.1) примет следующий вид:

$$v_n(x_0) = \int_S^* F_2(x_0, \xi) q(\xi) dS(\xi), \quad (3.2)$$

где $*$ обозначает, что интеграл несобственный. Имеется сингулярность $\lim_{x_0 \rightarrow \xi} F_2(x_0, \xi) = \infty$. Поэтому такое интегральное уравнение принято называть сингулярным. Несобственный интеграл в уравнении (3.2) сходящийся. При

вычислении интеграла по бесконечно малой полуокружности в центре с точкой ξ получается величина равная $-\frac{1}{2}q(x_0)$.

Поэтому, выражение (3.2) преобразуется к виду:

$$v_n(x_0) = -\frac{1}{2}q(x_0) + \int_S F_2(x_0, \xi)q(\xi)dS(\xi). \quad (3.3)$$

Здесь интеграл уже не содержит точку $x_0 = \xi$.

Граничное интегральное уравнение (3.3) аналитически не решается для областей с произвольной граничной линией. Применяется следующий численный алгоритм решения. Граничная линия дискретизируется прямолинейными отрезками (наиболее простые граничные элементы). Полагается, что на каждом из отрезков интенсивность $q(\xi)$ не изменяется. При переборе всех N полученных центров отрезков x_0^p получается система N линейных алгебраических уравнений, откуда определяются неизвестные $q(\xi^1), q(\xi^2), \dots, q(\xi^N)$:

$$-\frac{1}{2}q(x_0^p) + \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq p}}^N q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x_0^p, \xi^k) dS(\xi^k) = v_n(x_0^p), \quad p = 1, 2, \dots, N,$$

ξ^k - точка k -го отрезка, ΔS^k - длина k -го отрезка.

После решения этой системы уравнений, искомая скорость воздушного потока в данной точке вдоль произвольного направления, определяется с помощью следующей формулы:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x, \xi^k) dS(\xi^k).$$

При помощи выше описанных расчётных соотношений и разработанной компьютерной программы были выполнены вычислительные эксперименты, соответствующие натурным экспериментам.

Линии тока воздуха для случая $R_{тр} = 0,05$ м; $R_6 = 0,15$ м представлены на рисунке 3.2.а. Как показывает вычислительный эксперимент, рециркуляция воздушного потока существует. Однако, скорость восходящего воздушного потока в байпасном канале значительно отличается от экспериментальных замеров: 1,8 м/с против 0,43 м/с. Данная погрешность возникает вследствие некорректного сведения трёхмерной задачи к двумерной. Указанная некорректность была устранена следующим образом.

Полуширина нижнего короба (0,275 м) была выбрана в качестве характерного размера. При сохранении расхода воздушного потока, круглый канал был преобразован в щелевидный канал длиной 0,275 м и полушириной l , которая определялась из выражения $\pi R^2 = 0,275l$. В этом случае расчётные значения скорости воздуха удовлетворительно согласуются с экспериментальными (таблица 3.2). Линии тока в этом случае имеют вид, изображённый на рисунке 2б-г.

Таблица 3.2.

Сравнение расчётных и экспериментальных величин скорости

η	R_6 , м	l_6 , м	$v_{рец}^{экс}$, м/с	$v_{рец}^{числ}$, м/с
0,075	0,075	0,074	2,25	2,635
0,1	0,1	0,124	1,075	1,117
0,15	0,15	0,257	0,45	0,43

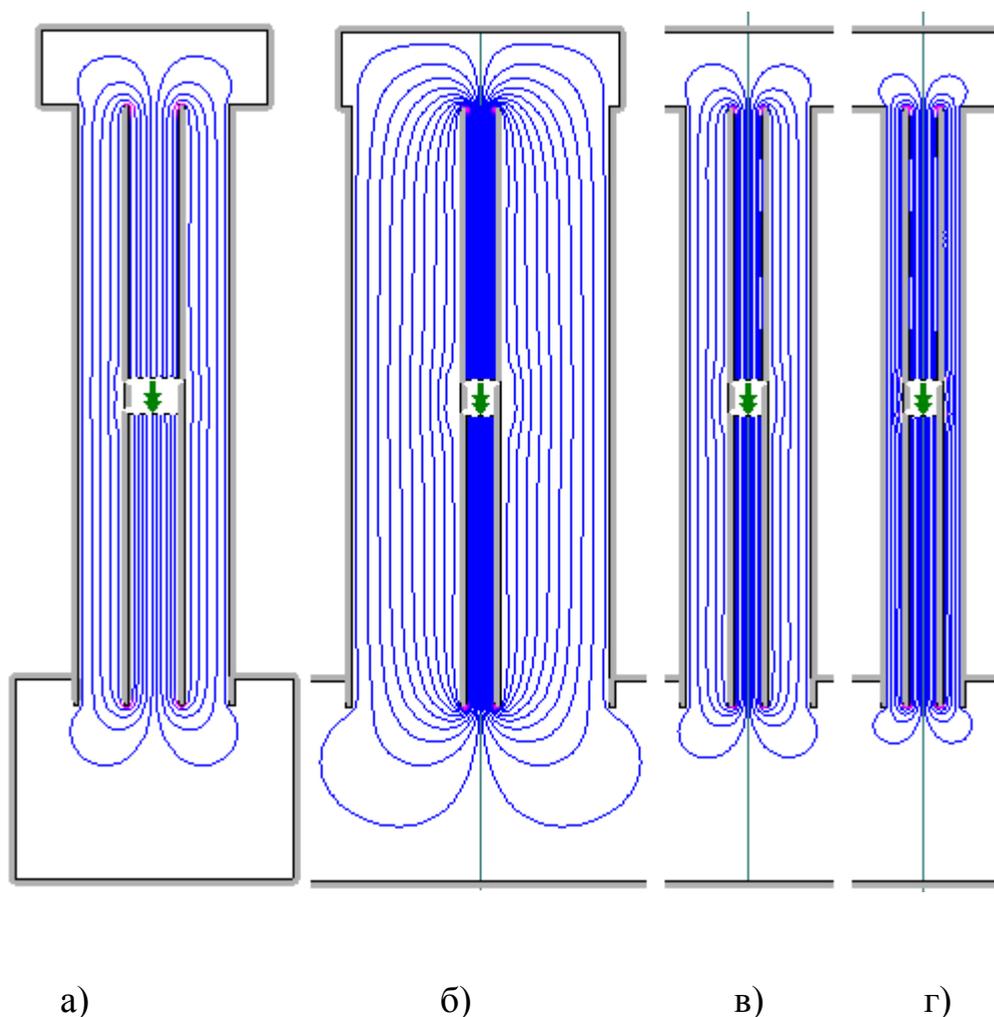


Рисунок 3.2 – Линии тока в зоне рециркуляции: а) $R_{\delta} = 0,15$ м; б) $l_{\delta} = 0,257$ м;
в) $l_{\delta} = 0,124$ м; г) $l_{\delta} = 0,074$ м

Таким образом, в процессе натурального и вычислительного экспериментов была исследована рециркуляция воздушного потока в системе «загрузочная труба - байпасный канал». Определены величины скорости воздуха и давления в байпасном канале. Коэффициент линейной корреляции для расчётных и экспериментальных величин скорости 0,9992, что говорит об их высокой тесноте связи. Критерий Стьюдента, выражающий разброс относительно среднего, равен 2,346 и меньше критической величины при уровне значимости 0,05.

3.3. Выявление оптимального соотношения размеров байпасной камеры и загрузочного канала

3.3.1. Натурный эксперимент

В этом параграфе исследовалось явление рециркуляции воздуха при торцевом перетекании воздуха между загрузочной трубой и байпасной камерой, устанавливаемой на входе в аспирационное укрытие, определялось оптимальное отношение диаметров байпасной камеры и загрузочной трубы. Кроме того, предпринята попытка визуализации рециркуляционного течения.

Экспериментальная установка для этого случая имела вид, представленный на рисунке 3.3.

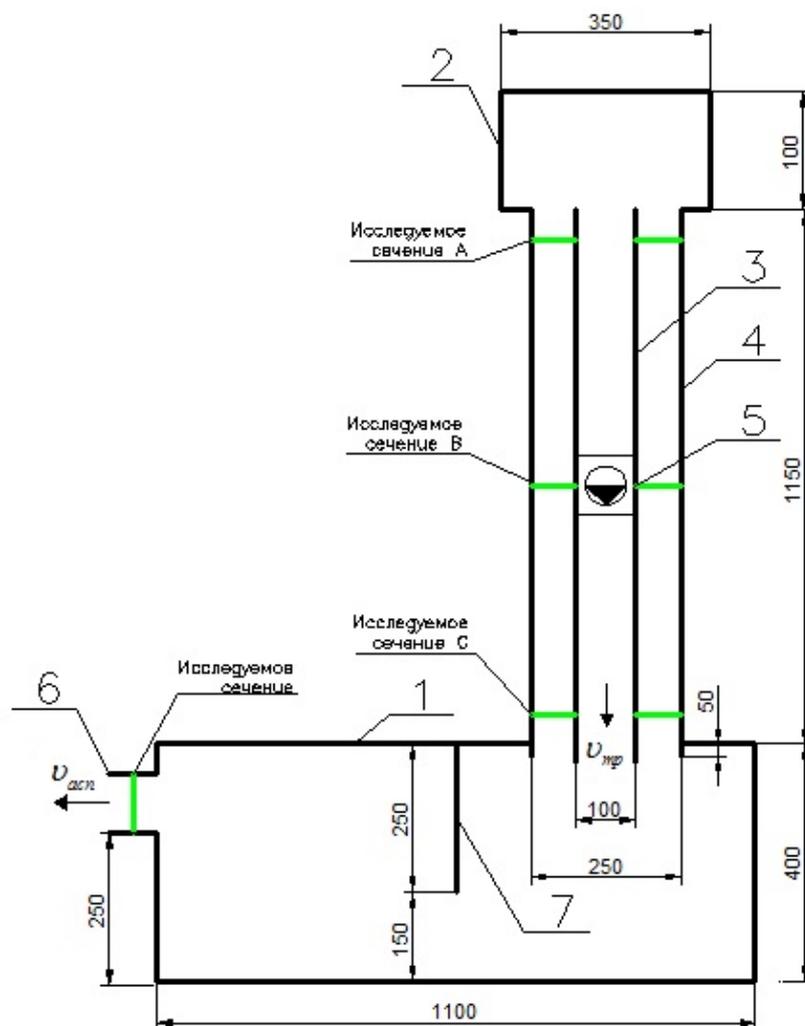


Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной установки: 1 – нижний короб; 2 – верхний короб; 3 – загрузочная труба; 4 – байпасная камера; 5 – нагнетатель; 6 – вытяжной патрубок; 7 – вертикальная перегородка.

Для визуализации динамики воздушных потоков использовался дым, подаваемый в байпасную камеру.

Для диаметра байпасной камеры $D_6 = 200$ мм и работе нагнетающего вентилятора наблюдения показали (рисунок 3.4), что дым поднимался вверх (черной линией показано направление движения), тем самым подтверждая то, что в верхнем коробе и по всей длине байпасной камеры образуется разрежение.



Рисунок 3.4 – Движение дыма при работе нагнетающего вентилятора

При работе вытяжного вентилятора (рисунок 3.5) воздух двигался вниз по байпасной камере.

Это показывает, что разрежение, создаваемое вытяжным вентилятором, действует не только в аспирируемой части короба, но и в приемной.



Рисунок 3.5 – Работа вытяжного вентилятора

При совместной работе вентиляторов (рисунок 3.6) дым также двигался вверх, но настирался на боковую стенку байпасной камеры. Измерения скорости воздуха термоанемометром при совместной работе вентиляторов показали, что скорость воздуха от стенки загрузочной трубы к стенке байпасной камеры возрастает.



Рисунок 3.6 – Движение дыма при совместной работе вентиляторов

При задымлении байпасной камеры $D_6 = 250$ мм наблюдалось следующее. При работе нагнетающего вентилятора дым поднимался вверх, так же, как и при совместной работе. При работе вытяжного вентилятора восходящий воздушный поток наблюдался в сечении С. В сечениях В и А поток дыма, подаваемого через трубочку, не отклонялся, а лишь «ударялся» о стенку байпасной камеры и уже рассеявшись, опускался вниз.

Задымление установки производилось также посредством создания дыма в приемной камере при поджигании горючего материала (бумаги).

При работе нагнетающего вентилятора и совместной работе вентиляторов дым заполнял полость байпасной камеры и полость верхнего короба. Так же наблюдались отрывы частиц прогоревшей бумаги, которые устремлялись в байпасную камеру. При работе нагнетающего вентилятора было замечено движение дыма в аспирируемую часть короба и выход его через отверстие, в котором установлен вытяжной вентилятор. Это показывает, что часть воздуха, подающегося в приемную камеру нагнетающим вентилятором, уходит в аспирируемую часть короба.

Были произведены измерения скорости воздуха в канале цилиндрической байпасной камеры (рисунок 3.3) при следующих исходных данных: параметры нижнего короба $1100 \text{ мм} \times 400 \text{ мм} \times 550 \text{ мм}$; размеры верхнего короба, в зависимости от диаметра байпасной камеры D_6 изменялись; диаметр байпасной камеры был равен 200, 250 и 300 мм (соответственно размер l изменяется: 0,175 м; 0,15 м; 0,125 м); диаметр загрузочной трубы не изменялся и составляет 100 мм; диаметр трубы вытяжного патрубка, где установлен вытяжной вентилятор 100 мм; скорость воздуха в загрузочной трубе v_{mp} составляла 4 м/с.

Измерение скорости в канале байпасной камеры производилось при полном погружении вытяжного зонда (10 – 15 мм от наружной стенки загрузочной трубы) в трех сечениях А, В, С (рисунок 3.3). Сечения А и С удалены от краёв байпасного канала на величину 100 мм. Сечение В находилось на удалении 550 мм от нижнего короба. Согласно полученным значениям, скорость воздуха при

движении из нижней точки в верхнюю, уменьшается. Однако, при входе в верхний короб она будет увеличиваться. Среднее значение скоростей воздуха в сечениях А и С приблизительно равно скорости в сечении В. Значения скоростей при различных диаметрах байпасного канала представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Экспериментальные значения величин скорости воздушного потока в цилиндрической байпасной камере.

D_0 , мм	Работа нагнетателя			$v_{цир}$, м/с	$Q_{цир}$, м ³ /с	Совместная работа			$v_{цир}$, м/с	$Q_{цир}$, м ³ /с	η
	А	В	С			А	В	С			
200	1,02	1,08	1,2	1,08	91,4	1,0	1,074	1,19	1,074	91,0	2
250	0,67	0,73	0,96	0,73	108,3	0,49	0,6	0,87	0,6	89,0	2,5
300	0,34	0,45	0,7	0,45	101,7	0,32	0,35	0,49	0,35	79,1	3

Примечание: при расчёте $Q_{цир}$ принимались значения скорости в точке В.

Значения скоростей при совместной работе вентиляторов практически не отличались от значений, полученных при работе лишь нагнетающего вентилятора. При приближении измерительного элемента к внутренней стенке байпасной камеры наблюдался рост скорости воздуха до 3 – 4 м/с. При работе одного нагнетающего вентилятора таких резких изменений скорости не наблюдалось. Задымление байпасной камеры при совместной работе вентиляторов показало, что воздух движется вверх.

Далее определено влияние рециркуляции на скорость вытесняемого $v_{асн}$ из укрытия воздуха. Для этого рассматривался случаи перекрытия байпасной камеры (отсутствие рециркуляции) и без ее перекрытия (присутствие рециркуляции). Перекрытие сечения байпасной камеры производилось в верхней части. В обоих случаях работал только нагнетающий вентилятор. Вытяжной вентилятор был выключен. Усреднённая по времени скорость $v_{асн}$ измерялась в сечении

вытяжного патрубка вентилятора (5 замеров по 30 секунд). Кроме того, измерения проводились с верхним коробом и без него (таблица 3.4). Как видно из результатов, рециркуляция воздуха оказывает существенное влияние на скорость воздуха вытесняемого из укрытия.

Таблица 3.4

Экспериментальные значения скорости воздуха вытесняемого из аспирационного укрытия

D_6 , мм	Без верхнего короба			С верхним коробом		
	v_{acn}^b , м/с	v_{acn}^c , м/с	δ , %	v_{acn}^b , м/с	v_{acn}^c , м/с	δ , %
150	1,32	2,76	52	0,76-0,78	1,12	30-32
200	0,78	2,4	68	0,45-0,48	0,77	38-42
250	0,57	1,95	71	0,41	0,55	34
300	0,44	1,33	67	0,3-0,37	0,47	21-36

Величина $\delta = (v_{acn}^c - v_{acn}^b) / (v_{acn}^c) \cdot 100\%$ снижения скорости без перекрытия байпасной камеры v_{acn}^b относительно скорости воздуха с перекрытием байпасной камеры v_{acn}^c существенна и достигает наибольшего значения при диаметре D_6 байпасной камеры 200–250 мм.

Предполагалось, что при перекрытии байпасной камеры при наличии или отсутствии верхнего короба, скорость удаляемого из укрытия воздуха будет постоянной для всех рассматриваемых диаметров байпасной камеры, т.к. в этом случае байпасная камера не играет никакой роли. Однако, полученные данные отличаются между собой. Это объясняется тем, что перекрытие байпасного канала не было полностью герметичным и, из-за этого, происходила частичная рециркуляция воздуха, что приводило к снижению количества удаляемого воздуха. Однако, на общую эффективность использования байпасной камеры это не повлияло.

3.3.2. Вычислительный эксперимент

Вычислительный алгоритм строился также как и в п.3.2.2.

Для сведения задачи к плоскости (рисунок 3.7), круги преобразовались в прямоугольники с длиной равной 0,275 м. Т.е., например радиус загрузочной трубы, как и радиус трубы, где установлен вытяжной вентилятор будет соответствовать полуширине $a = \pi R_m^2 / (2 \cdot 0,275) = \pi \cdot 0,05^2 / 0,55 = 0,014$ м. То же и с величиной $b = \pi R_o^2 / (2 \cdot 0,275)$.

Граница области дискретизировалась набором около 11000 прямолинейных отрезков. Скорость $v_{mp} = 4$ м/с постоянна для всех вычислительных экспериментов.

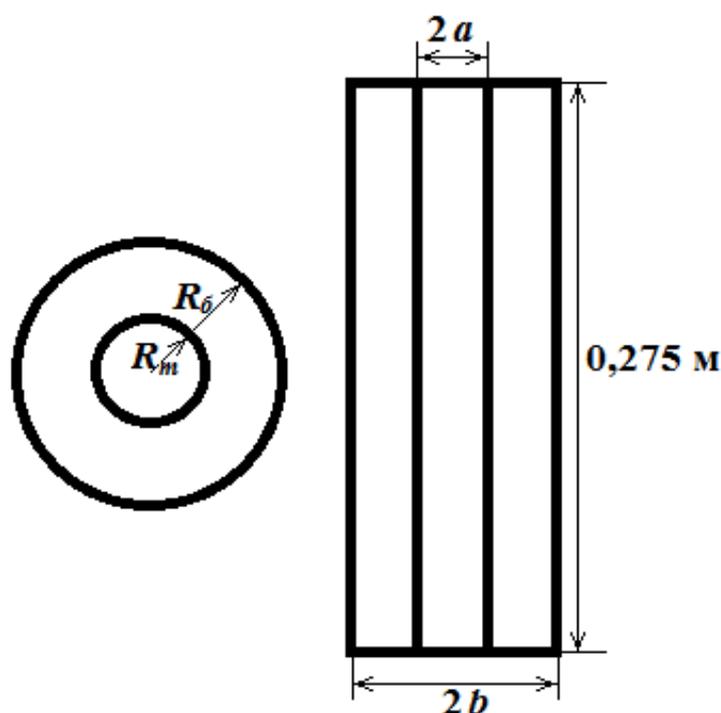


Рисунок 3.7 – Сведение задачи к плоскости

Вычислительные эксперименты при постоянном радиусе байпасной камеры $R_o = 0,1$ м (рисунок 3.8) и разной скорости v_{acn} в вытяжной трубе показали, что скорость рециркулируемого воздуха в байпасной камере (таблица 3.5) снижается при увеличении скорости вытяжки v_{acn} . При $v_{acn} = v_{mp} = 4$ м/с рециркуляции не

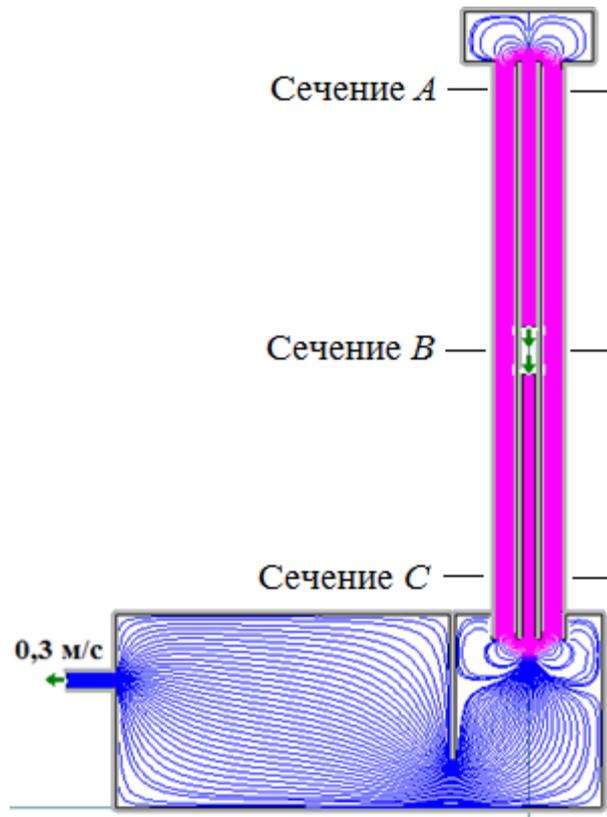
наблюдается. Заметим, также, что при увеличении v_{acn} уменьшается область рециркуляции и в самом аспирационном укрытии, которая еще заметна на рисунке 3.8а и рисунке 3.8б. При дальнейшем увеличении скорости этой рециркуляционной области внутри укрытия не наблюдается. При увеличении радиуса байпасной камеры и постоянной скорости вытяжки (рисунок 3.9) v_{acn} скорости в характерных точках байпасной камеры снижаются (таблица 3.5), что согласуется с экспериментальными замерами (таблица 3.3).

Таблица 3.5

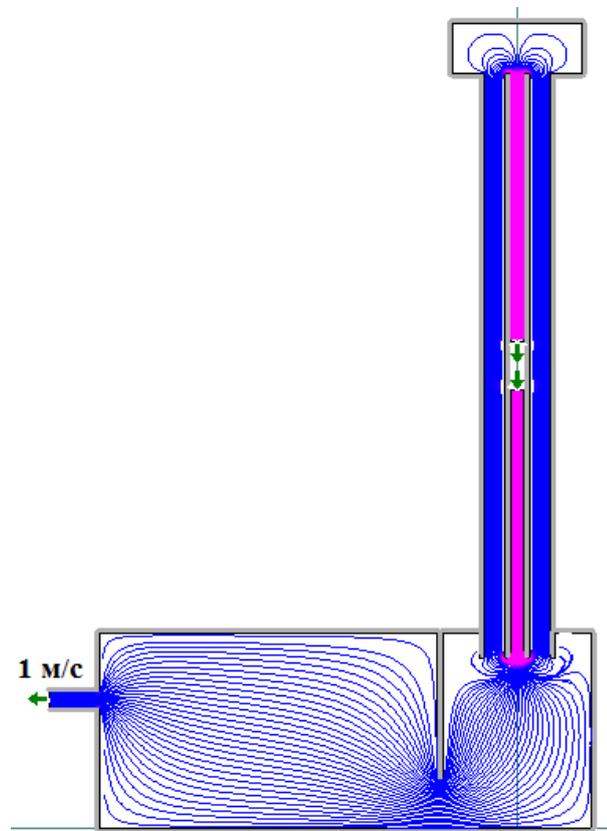
Величины скорости в характерных точках байпасного канала

Номер рисунка	v_A , м/с	v_B , м/с	v_C , м/с
Рис. 3.8 а	1,18	1,19	1,18
Рис. 3.8 б	0,945	0,962	0,944
Рис. 3.8 в	0,612	0,624	0,612
Рис. 3.8 г	0,279	0,287	0,281
Рис. 3.8 д	0	0	0
Рис. 3.9 а	0,78	0,80	0,78
Рис. 3.9 б	0,487	0,505	0,489

Таким образом, при снабжении загрузочного канала аспирационного укрытия байпасной камерой, где перетекание воздуха осуществляется на их торцах, возникает рециркуляция воздуха. Экспериментально доказано, что явление рециркуляции воздуха способствует снижению расхода воздуха, вытесняемого из укрытия, а значит и объема эжектируемого воздуха. Наиболее рациональным представляется соотношение диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы равное 2-2,5. В этом случае объем эжектируемого воздуха может быть снижен в диапазоне от 38% до 68%.

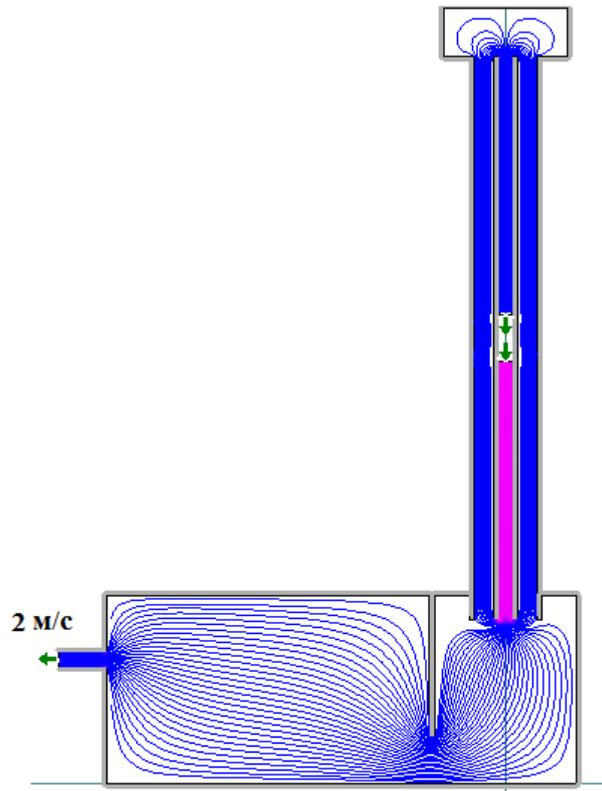


а)

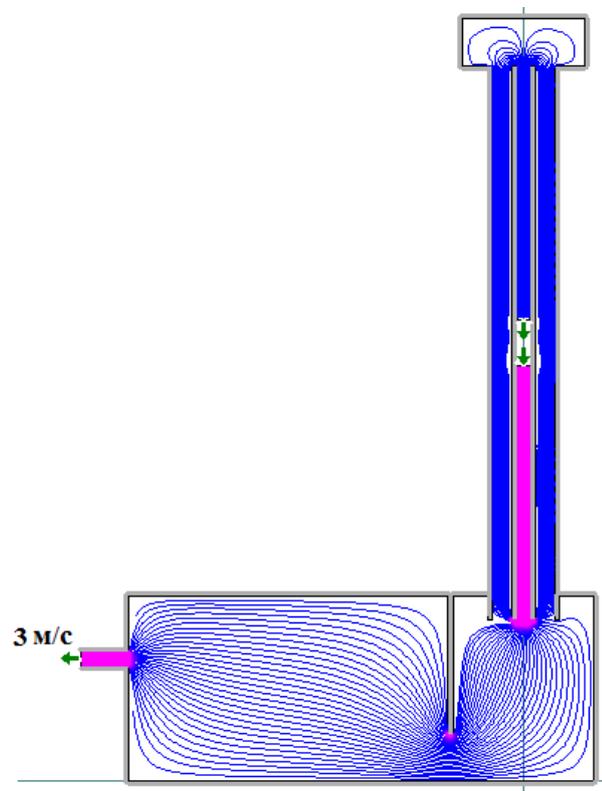


б)

Рисунок 3.8 – Линии тока в аспирационном укрытии при $R_0 = 0,1$ м (Начало)

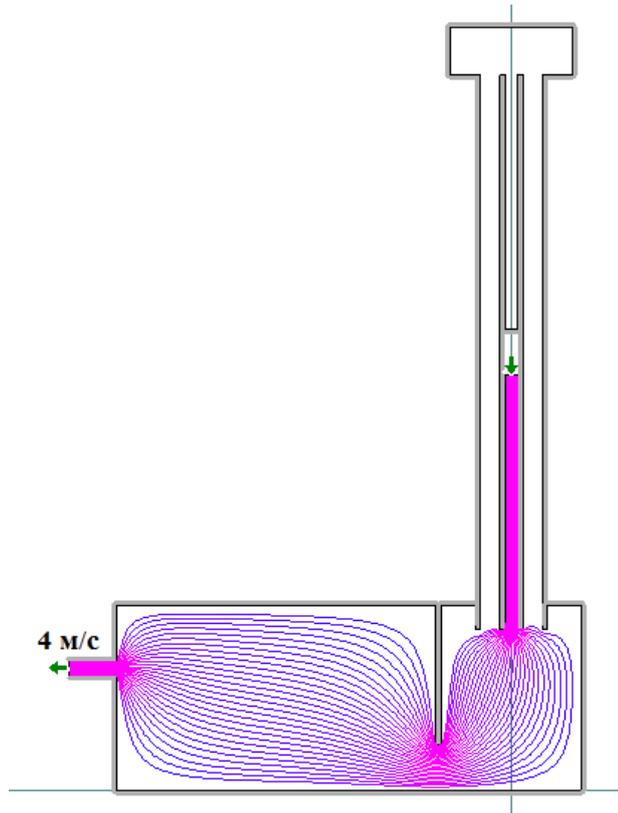


B)

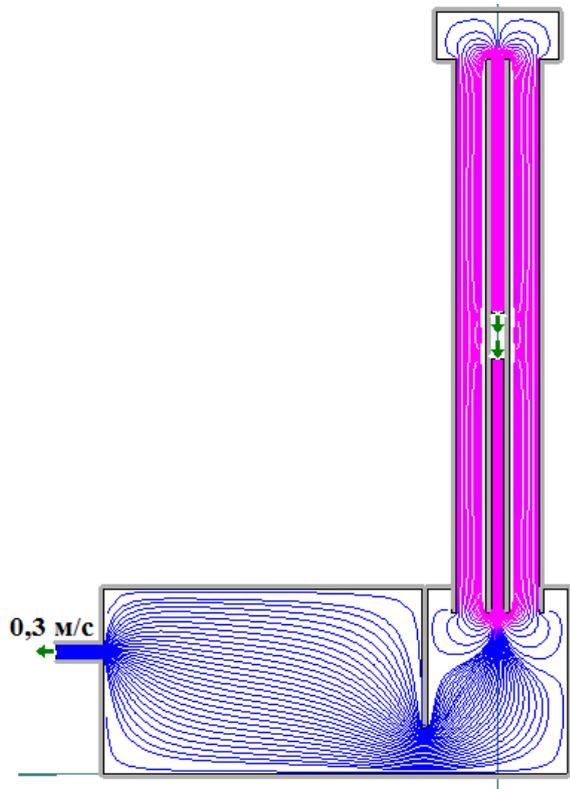


Г)

Рисунок 3.8 – Линии тока в аспирационном укрытии при $R_0 = 0,1$ м (Продолжение)



д)

Рисунок 3.8 – Линии тока в аспирационном укрытии при $R_0 = 0,1$ м (Окончание)

а)

Рисунок 3.9 – Линии тока при разных радиусах байпасного канала (Начало)

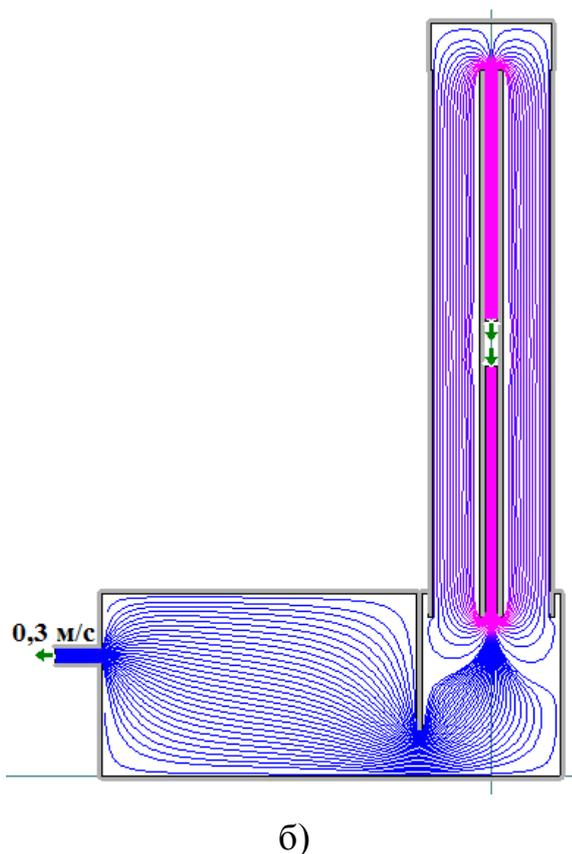


Рисунок 3.9 – Линии тока при разных радиусах байпасного канала: *a* - $R_0 = 0,125$ м; *б* - $R_0 = 0,15$ м (Окончание)

В результате численного и натурного экспериментов показано, что скорость рециркуляционного воздуха снижается при увеличении радиуса байпасной камеры. Величины скорости удовлетворительно согласуются и отличаются между собой не более чем на 20%. Вычислительный эксперимент показывает, что при увеличении скорости воздуха, отсасываемого из аспирационного укрытия, скорость рециркуляции снижается вплоть до нуля. Однако натуральный эксперимент такого явления не улавливает. Это связано с тем, что производительность вытяжного вентилятора была ниже из-за высокого аэродинамического сопротивления, обусловленного наличием верхнего короба и жесткой вертикальной перегородки.

3.4. Исследование рециркуляции при перетекании воздуха через отверстия перфорации загрузочной трубы

Для исследования рециркуляции воздуха в цилиндрической байпасной камере при наличии перфорации на загрузочной трубе экспериментальная установка претерпела некоторые изменения (рисунок 3.10).

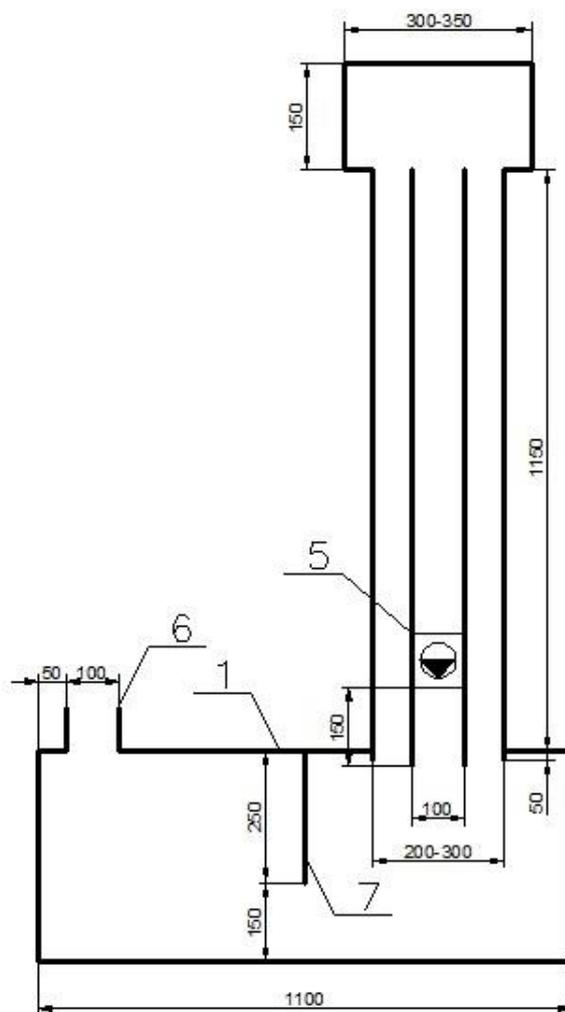


Рисунок 3.10 – Схема полупромышленной установки загрузочной трубы с байпасной камерой:

1 - нижний короб, 2 - верхний короб, 3 - байпасная камера, 4 - загрузочная труба, 5 - осевой вентилятор, 6 - вытяжной патрубок, 7 - вертикальная перегородка.

Вентилятор, имитирующий поток эжекционного воздуха, был перенесен на 0,15 м от нижней части байпасной камеры. Такое его положение наиболее приближено к реальным условиям, так как при перегрузке материала в нижней части загрузочной трубы образуется область избыточного давления, а в верхней части - область разрежения. Вытяжной патрубок был перенесен на верхнюю

крышку нижнего короба в его аспирируемой части для максимального приближения к реальному аспирационному укрытию.

В ходе эксперимента необходимо было определить следующее:

- оказывает ли перфорация влияние на рециркуляцию воздуха в байпасной камере и какова ее эффективность;

- какова должна быть степень перфорации для увеличения рециркуляции воздуха.

Для определения влияния перфорации были проведены измерения скорости воздушного потока, удаляемого через вытяжной патрубок нижнего короба. Как и полагалось ранее, если скорость вытесняемого из укрытия воздуха при перфорировании загрузочной трубы будет уменьшаться, то и расход воздушного потока, аспирируемого из укрытия, будет также снижаться. Это сделает систему аспирации менее энергоёмкой, т.к. расход удаляемого из полости аспирационного укрытия воздуха связан с затратами электроэнергии, которая необходима для работы вытяжного вентилятора.

Натурный эксперимент проводился с целью выяснения смысла использования перфорации вообще. В первом случае нижняя и верхняя части байпасной камеры перекрывались (рисунок 3.11а), а во втором – перекрывалась лишь нижняя часть (рисунок 3.11б). Диаметр байпасной камеры составлял 200 мм.

Установка включалась, и производилось задымление байпасной камеры через отверстие в стенке. В первом случае дым поступал из отверстия в пространство помещения (рисунок 3.12). Это означало, что воздух из отверстий перфорации в загрузочной трубе поступает в байпасный канал, заполняя собой пространство канала и увеличивая в нём давление. Во втором случае дым поднимался вверх, и его поступления в окружающее пространство через отверстие перфорации не наблюдалось (рисунок 3.13). В верхней части байпасного канала и верхнем коробе наблюдается разрежение, поэтому задымленный воздух двигался в эту область. Помимо задымления полости

байпасной камеры производились замеры скоростей воздуха в вытяжном патрубке.

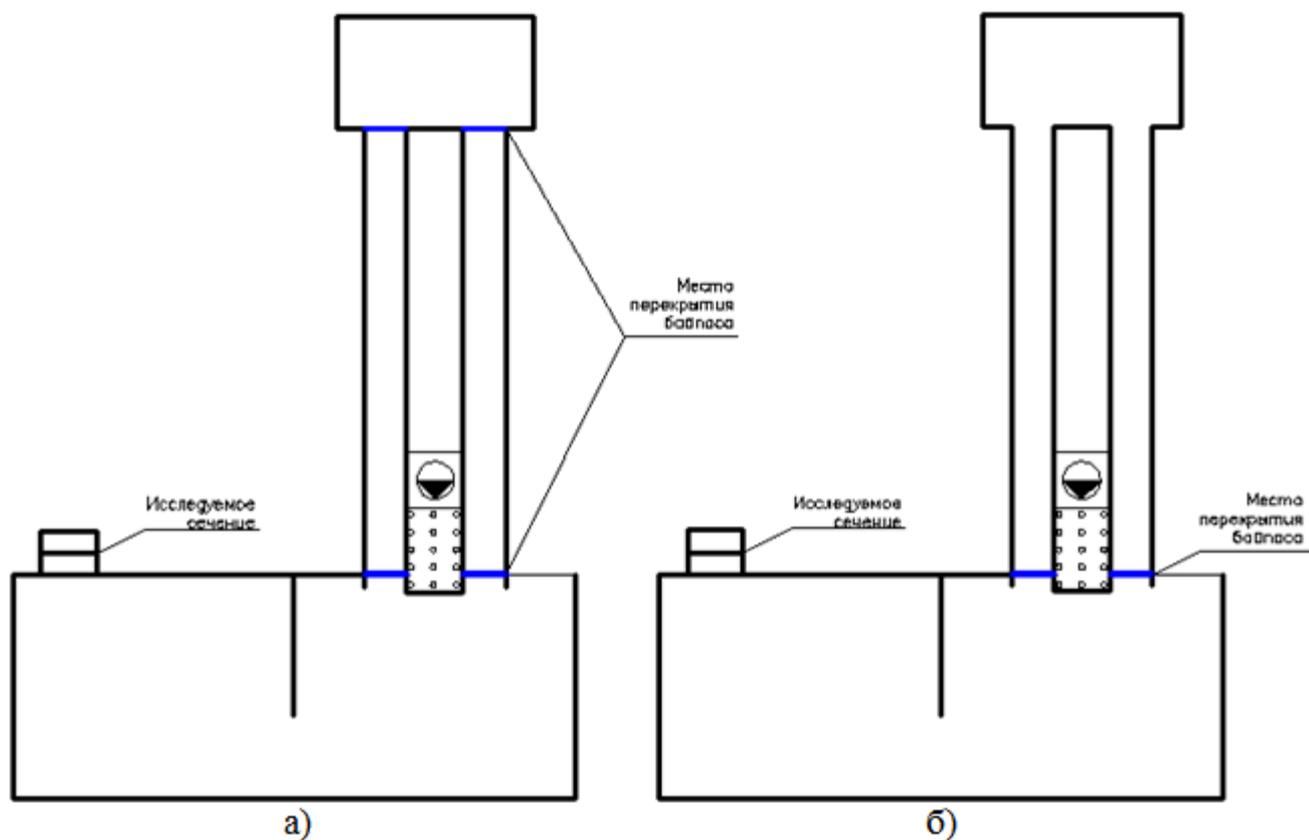


Рисунок 3.11 – Схема нанесения перфорации в области избыточного давления: а) при перекрытии байпасной камеры в верхней и нижней части; б) при перекрытии байпасной камеры в нижней части



Рисунок 3.12 – Задымление при полном перекрытии байпасной камеры.



Рисунок 3.13 – Задымление при перекрытии байпасной камеры в нижней части.

Измерения выполнялись в сечении вытяжного патрубка с помощью термоанемометра Testo 425. Эксперимент повторялся трижды для проверки точности получения данных. Как и ранее, производилось измерение усреднённых по времени значений скорости v_i , где i - номер эксперимента. Проводилось 5 замеров в течение 30 секунд. После этого определялось среднее значение

скорости воздушного потока в сечении вытяжного канала: $v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$, где n -

количество измерений. Торцевые перетекания воздуха отсутствовали, поскольку байпасный канал был перекрыт. Найденные величины скоростей воздушного потока представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Скорости и расход воздушного потока в вытяжном канале при отсутствии байпасирования

v_1 , м/с	v_2 , м/с	v_3 , м/с	v , м/с	Q_{acn} , м ³ /ч
1,078	1,051	1,003	1,044	29,5

В нижней части загрузочной трубы, непосредственно перед нагнетателем, равномерно наносились 35 отверстий перфорации диаметром 5 мм 35 шт. (7 рядов по 5 отверстий) и производился замер величин скорости воздушного потока в сечении вытяжного канала. Определялся расход удаляемого воздуха при данном количестве отверстий, нанесённых в области избыточного давления. Величины скоростей воздушного потока в вытяжном канале при перфорированной загрузочной трубе представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Величины скорости и расхода воздушного потока в вытяжном канале при наличии перфорации

v_1 , м/с	v_2 , м/с	v_3 , м/с	v , м/с	$Q_{асп}$, м ³ /ч
0,85	0,858	0,864	0,857	24,2

Наличие отверстий перфорации снижает расход удаляемого воздуха на 17%.

Величины скоростей и расхода воздушного потока при наличии торцевого перетекания в цилиндрической байпасной камере диаметром 200 мм без перфорации стенок загрузочной трубы представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Величины скорости и расхода воздуха в вытяжном канале при наличии торцевого перетекания и отсутствии перфорации

v_1 , м/с	v_2 , м/с	v_3 , м/с	v , м/с	$Q_{асп}$, м ³ /ч
0,31	0,319	0,322	0,31-0,32	9

Измерения скорости потока рециркулируемого воздуха проводились в байпасном канале. В сечении, на расстоянии половины длины байпасного канала, делались четыре отверстия удалённых друг от друга на одинаковое расстояние и с помощью термоанемометра производились усреднённые по времени измерения скорости воздушного потока. В каждом отверстии производилось 10 замеров, а

затем определялось среднее значение скорости воздушного потока в данном сечении. Скорость рециркулируемого воздуха составила в среднем 0,81 м/с.

При сравнении данных из таблицы 3.6 и таблицы 3.8 было определено, что наличие цилиндрической байпасной камеры диаметром 200 мм снижает расход удаляемого воздуха на 69%.

3.5. Исследование рециркуляции воздушных течений при комбинированном байпасировании

В эксперименте по выявлению эффекта снижения расхода вытесняемого из укрытия воздуха, при комбинированном перетекании воздуха через торцы байпасной камеры и перфорационные отверстия загрузочной трубы, в начале исследовалась рециркуляция воздуха при наличии торцевого перетекания и перфорации, нанесенной в области избыточного давления. Предполагалось, что воздух под давлением будет выбиваться через отверстия в полость байпасной камеры, снижая объем воздуха поступающего в нижний короб, а, следовательно, снизится и эжекция воздуха. При реальных перегрузках сыпучего материала в нижней части загрузочной трубы избыточное давление имеет максимальное значение. Поэтому эжектируемый воздух будет поступать из загрузочной трубы через отверстия в байпасный канал. Для подтверждения этого на нижнюю часть загрузочной трубы наносились отверстия перфорации диаметром 5 мм в количестве 35 шт, как и в ранее проведенном опыте. Установка включалась, и проводились измерения скорости удаляемого воздуха. Результаты измерений не дали положительных результатов, так как полученные значения скоростей не отличались от величин скорости воздуха в вытяжном канале при наличии только торцевого перетекания. Это объясняется тем, что воздух, выходящий из отверстий, создает воздушную завесу, увеличивая тем самым гидравлическое сопротивление байпасной камеры, поэтому расход удаляемого воздуха не изменяется. Для решения этой проблемы предполагалось, что нанесение перфорации в местах, где избыточное давление не высокое или преобладает зона

разрежения позволит исключить образование воздушной завесы и сделать работу перфорации эффективной. Поэтому перфорировалась верхняя часть трубы, где находилась зона разрежения. Отверстия распределялись равномерно, начиная сверху трубы с увеличением их количества. Эксперимент проводился 3 раза. Вначале измерялась усреднённая по времени скорость v_i в случае отсутствия перфорации. Далее на поверхность загрузочной трубы наносилось 11 отверстий в 7 рядов, и измерялась скорость (рисунок 3.14, рисунок 3.15). При увеличении количества отверстий скорость воздушного потока в сечении вытяжного канала уменьшалась (таблица 3.9). Все измерения проводились в течение 30 сек. по 5 замеров в каждом эксперименте. Среднее значение скорости в сечении

находилось по формуле $v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$.

Таблица 3.9

Скорости воздуха в вытяжном патрубке при различном количестве отверстий на загрузочной трубе при комбинированном использовании байпасной камеры и перфорации

Кол-во отверстий Ø 5 мм, шт	v_1 , м/с	v_2 , м/с	v_3 , м/с	v , м/с	$Q_{асп}$, м ³ /ч
0	0,282	0,281	0,287	0,283	8,002
7x11	0,26	0,262	0,261	0,261	7,380
7x22	0,267	0,254	0,255	0,259	7,323
7x33	0,254	0,232	0,234	0,240	6,786

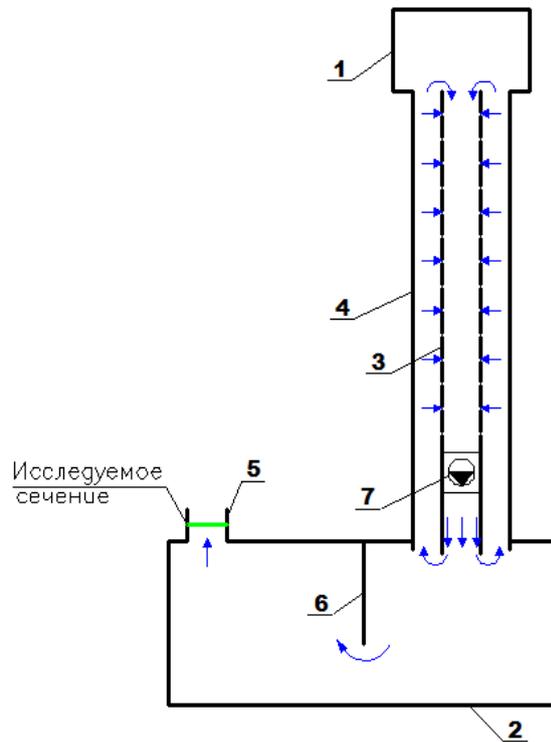


Рисунок 3.14 – Схема экспериментальной установки для исследования совместной работы байпасной камеры и перфорированной загрузочной трубы

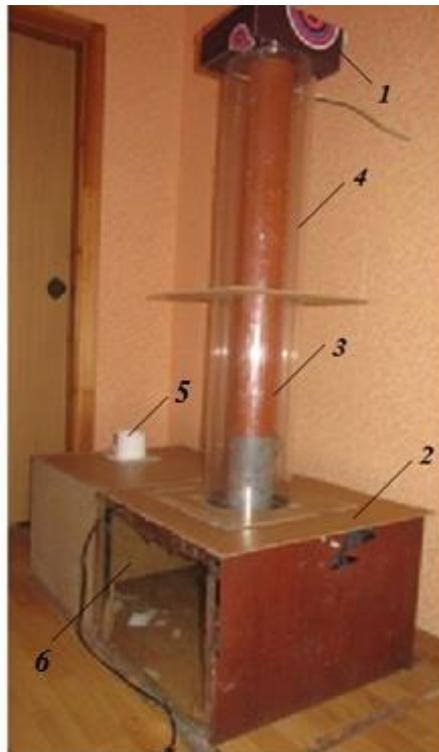


Рисунок 3.15 – Фото экспериментального стенда: 1, 2 - верхний и нижний короба, 3 - загрузочная труба, 4 - байпасный канал, 5 - вытяжной канал, 6 - вертикальная перегородка

С целью наблюдения поведения воздушного потока при наличии перфорации проводилось задымление байпасного канала. Дым в него подавался с помощью пластиковой трубочки, поднимался вверх, настилаясь частично на стенки загрузочной трубы. Такое поведение задымленного потока воздуха объясняется созданием большей области разрежения в байпасном канале путём перфорации стенок загрузочной трубы относительно непроницаемой трубы. Экспериментально установлено, что путём использования перфорации стенок загрузочной трубы, путем сравнения данных таблицы 3.9 (при отсутствии и наличии перфорации по всей длине трубы в области разряжения) расход аспирируемого воздуха снижается на 15%. Комбинированное байпасирование позволит снизить расход на 84%.

3.6. Исследование рециркуляции воздуха в цилиндрической байпасной камере при перегрузке сыпучего материала

Проведение исследований по перегрузке сыпучего материала на разработанном стенде необходимо для подтверждения достоверности ранее проведенных исследований в условиях эксперимента, приближенных к реальным. Проведенные ранее исследования с имитационным моделированием потока эжектируемого воздуха при помощи осевого вентилятора дали удовлетворительно согласующиеся с численным экспериментом результаты. Использование имитационного моделирования позволит в дальнейшем проводить более сложные эксперименты, не прибегая к громоздким и дорогостоящим устройствам. Однако, для создания более полной картины процессов рециркуляции воздуха при торцевом перетекании потока эжектируемого воздуха в полость байпасной камеры необходимо исследование с перегрузкой сыпучего материала.

Для проведения исследований экспериментальный стенд претерпел некоторые изменения, а именно: отсутствуют верхний короб укрытия и осевой вентилятор (рисунок 3. 16). Верхний короб убирался для осуществления загрузки материала, а осевой вентилятор за ненадобностью. Т.к. в реальных условиях

перегрузка осуществляется конвейерным способом, а в условиях эксперимента, к сожалению, воссоздать по техническим причинам это невозможно, то перегрузка проводилась путем выгрузки сыпучего материала из емкости по загрузочной трубе в полость нижнего укрытия.

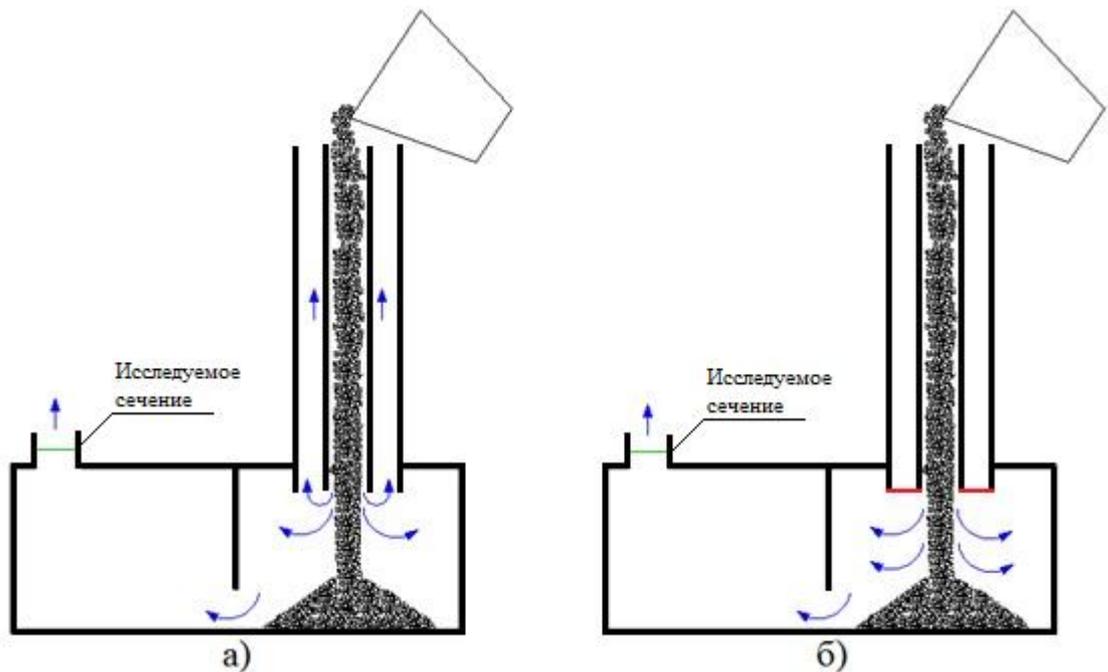


Рисунок 3.16. – Схема перегрузки сыпучего материала: а) при наличии торцевых перегородок; б) при отсутствии торцевых перегородок

В качестве перегружаемого материала использовалась опока - пористая кремнистая осадочная горная порода (рисунок 3.16). Размер кусков материала составлял 4-10 мм. Масса перегружаемого материала составила 2,2 кг, занимаемый объем 3 л.



Рисунок 3.17 – Фото перегружаемого материала

Для определения эффективности байпасирования при перегрузке сыпучего материала, эксперимент проводился следующим образом.

В начале перекрывалось сечение байпасной камеры в нижней части, чтобы исключить рециркуляцию воздуха. Таким образом, наличие байпасной камеры исключалось из процесса работы установки.

Затем производилась перегрузка сыпучего материала с замерами скоростей воздуха удаляемого через вытяжной патрубок. В качестве измерительного прибора использовался TESTO 425. Замеры скорости, производились по времени всей перегрузки: прибор включался в начале выгрузки материала и выключался после ее завершения.

Байпасная камера открывалась (убиралось перекрытие) и осуществлялась перегрузка материала с наличием торцевого перетекания. Полученные значения записывались и вычислялись средние значения скоростей удаляемого воздуха (таблица 3.10).

Таблица 3.10

Величины скоростей и расходов воздушного потока
при перегрузке сыпучего материала

Средняя скорость воздуха в вытяжном канале при отсутствии торцевого перетекания v^c , м/с	Расход аспирируемого воздуха при перекрытии торцевого перетекания $Q_{асп}$, м ³ /ч	Средняя скорость воздуха в вытяжном канале при наличии торцевого перетекания v^b , м/с	Расход воздуха в вытяжном канале при наличии торцевого перетекания $Q_{асп}$, м ³ /ч
0,83	23,5	0,37	10,5

Для определения влияния рециркуляции воздушного потока на снижение расхода эжектируемого воздуха производилось сравнение значений скоростей удаляемого воздуха, при наличии и отсутствии торцевых перетеканий, а сама

эффективность находилась по формуле $\delta = \left(\frac{v^c - v^\sigma}{v^c} \right) \cdot 100\%$. В данном случае количество удаляемого из нижнего короба воздуха снизилось на 55%.

В ходе проведения эксперимента производилась видеосъемка процесса перегрузки материала в приемную часть нижнего короба. Было выявлено образование вихрей запыленного воздуха по обе стороны от потока падающего материала (рисунок 3.17). Поток запыленного воздуха циркулировал в области потока падающего материала и частично поднимался к входному отверстию байпасной камеры.

Сравнив данные, полученные в ходе экспериментов по перегрузке материала и имитации его вентилятором (пункт 3.4), было определено, что результаты различаются между собой не более величины в 14%.

Это подтверждает, что применение соосно расположенных загрузочной трубы и цилиндрической байпасной камеры позволит более чем наполовину снизить затраты на аспирацию воздуха, за счет рециркуляции поступающего в укрытие эжектируемого воздуха



Рисунок 3.18 – Образование вихрей запыленного воздуха в приемной камере

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

1. При помощи натурального и вычислительного экспериментов исследована рециркуляция воздуха в соосно расположенных круглой загрузочной трубе и круглой байпасной камере. Определены величины скорости воздушного потока и давлений в байпасном канале. Наблюдается удовлетворительное согласование величин скорости, найденных экспериментально и численно, что подтверждает адекватность экспериментальных замеров скорости.

2. Исследовано явление рециркуляции воздуха в загрузочной трубе, содержащейся в круглой байпасной камере, установленных на входе аспирационного укрытия. Выявлено, что при снабжении загрузочного канала аспирационного укрытия байпасной камерой, где перетекание воздуха осуществляется на их торцах, возникает рециркуляция воздуха. Экспериментально доказано, что явление рециркуляции воздуха способствует снижению расхода воздуха, вытесняемого из укрытия, а значит и объема эжектируемого воздуха. Наиболее рациональным представляется соотношение диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы равное 2-2,5.

В результате численного и натурального экспериментов показано, что скорость рециркуляционного воздуха снижается при увеличении радиуса байпасной камеры. Величины скорости удовлетворительно согласуются и отличаются не более чем на 20%. Вычислительный эксперимент показывает, что при увеличении скорости воздуха, отсасываемого из аспирационного укрытия, скорость рециркуляции снижается вплоть до нуля.

3. Исследовано влияние перфорации загрузочного канала на снижение объема аспирации. Определено, что комбинированное байпасирование даёт результат только в случае, когда перфорация находится в области разрежения. При нанесении перфорации в области избыточного давления, воздух, выходящий из отверстий в полость байпасной камеры, создает сопротивление восходящему потоку воздуха, из-за чего объем удаляемого воздуха не изменяется.

Использование только торцевого перетекания воздушного потока из загрузочной трубы в байпасный канал может снизить расход эжектируемого воздуха до 69%, а при комбинированном байпасировании - до 84%. Полученный энергосберегающий эффект при использовании комбинированной рециркуляции через перфорационные отверстия и торцевом перетекании совпадает с теоретическими расчётами, изложенными в главе 2.

4. Исследован процесс рециркуляции воздуха при перегрузке сыпучего материала. Доказано, что применение цилиндрической байпасной камеры соосно расположенной относительно загрузочной трубы позволяет снизить объемы удаляемого воздуха до 60% за счет рециркуляции эжектируемого воздуха, поступающего в нижнее укрытие по загрузочной трубе. Полученные в ходе экспериментов значения по имитационному моделированию потока эжектируемого воздуха и по перегрузке сыпучего материала удовлетворительно согласуются.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОБЪЕМА ЭЖЕКТИРУЕМОГО ВОЗДУХА И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ

Согласно проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям (глава 2-3) были определены аэродинамические характеристики разработанного укрытия [120-125].

Разработка инженерной методики расчета объемов аспирации базировалась на основе имеющихся методик и с учетом полученных экспериментальных данных.

4.1. Методика расчета объемов воздуха, удаляемого из аспирационного укрытия

Используя динамический подход для определения количества эжектируемого воздуха, описанный в работах О. Д. Нейкова, И. Н. Логачева [1, 31, 18, 32-34] и В. А. Минко [2, 3, 35-37], а также данные полученные входе проведенных экспериментов по пылеаэродинамике предложенной конструкции аспирационного укрытия [120-125], была разработана инженерная методика расчета объема отсасываемого воздуха, которая позволяет учитывать поток эжектируемого воздуха и влияние конструктивных особенностей укрытия на количество аспирируемого воздуха и расход рециркулируемого воздушного потока.

Основу данной методики составляют расчётные зависимости количества эжектируемого воздуха, одним из основных параметров которых является аэродинамическое сопротивление оборудования: "верхнее укрытие – перегрузочный канал - нижнее укрытие" [129].

Исходные данные для выполнения расчета следующие:

1. Характеристика перегружаемого материала: гранулометрический состав, плотность материала ρ_m , расход материала G_m .

2. Характеристика перегрузочного узла: схема узла с высотами падения сыпучего материала, тип аспирационного укрытия, площадь сечения загрузочного жёлоба $F_{ж}$, площади неплотностей укрытий.

Расчёт объёмов аспирируемого воздуха ведут в следующей последовательности.

1. Определяется скорость потока падающего по жёлобу материала при входе в укрытие v_k путём расчёта скорости движения сыпучего материала на каждом прямолинейном участке загрузочного жёлоба:

а) для вертикального участка

$$v_k = \sqrt{v_n^2 + 2gh}, \quad (4.1)$$

б) для наклонного участка

$$v_k = \sqrt{(v_n \cdot \sin \alpha)^2 + 2gh(1 - 0,5 \cdot \operatorname{ctg} \alpha)}. \quad (4.2)$$

Скорость в жёлобе, изображённом на рисунке 2.1, будет определяться следующим образом:

а) скорость в начале желоба

$$v_n = \sqrt{2gh_1}, \quad g = 9,81 \text{ м/с}^2. \quad (4.3)$$

б) скорость в конце участка

$$v_k = \sqrt{v_n^2 + 2gh_2}. \quad (4.4)$$

2. Значение объёмной концентрации частиц в желобе, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$\beta = \frac{2 \cdot G_m}{\rho_m \cdot F_{ж} \cdot (1+n) \cdot v_k}, \quad (4.5)$$

где $n = v_n/v_k$ - отношение скоростей падения частиц сыпучего материала в начале и конце желоба;

3. Средний диаметр частиц сыпучего материала, мм:

$$d = \sum_{i=1}^9 m_i d_i, \quad (4.6)$$

где m_i - процентное содержание частиц диаметром d_i по массе.

При значении $d \leq 14,6 \cdot \sqrt{\beta}$ в качестве расчетного следует принимать средний диаметр $d = 14,6 \cdot \sqrt{\beta}$.

4. Сумма коэффициентов местных сопротивлений укрытий и желоба аспирационной системы

$$\sum \zeta = \zeta_{\text{вн}} + \zeta_{\text{ж}} + \zeta_{\text{нн}}, \quad (4.7)$$

где $\zeta_{\text{нн}}$ - к.м.с. нижнего укрытия; $\zeta_{\text{ж}}$ - к.м.с. желоба (для вертикальных желобов принимается $\zeta_{\text{ж}} = 1,5$; $\alpha = 90^\circ$); $\zeta_{\text{вн}}$ - к.м.с. верхнего укрытия.

Для укрытий имеющих жёсткую внутреннюю перегородку величина $\zeta_{\text{нн}}$ зависит от отношения площадей поперечного сечения желоба и перегородки $F_{\text{ж}}/F_n$ и отношения высот перегородки и укрытия H_n/H_y . Значение $\zeta_{\text{нн}}$ для укрытий представлены в табл. 4.1 [129]. Без внутренней перегородки полагается $\zeta_{\text{нн}} = 0$.

Величина к.м.с. верхнего укрытия $\zeta_{\text{вн}}$ рассчитывается по формуле:

$$\zeta_{\text{вн}} = 2,4 \left(\frac{F_{\text{ж}}}{f_n} \right)^2, \quad (4.8)$$

где f_n - площадь неплотностей верхнего укрытия, м².

Таблица 4.1.

Значения $\zeta_{\text{нн}}$ для укрытий

$F_{\text{ж}}/F_n$	H_n/H_y				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1,0	193	44,5	17,8	8,12	4,02
0,8	124	28,5	11,4	6,19	2,57
0,6	69,5	16,0	6,41	2,92	1,45
0,4	30,9	7,12	2,84	1,3	0,64
0,2	7,72	1,78	0,71	0,32	0,16
0,1	1,93	0,45	0,18	0,08	0,04

5. Коэффициент лобового сопротивления определяется по формуле:

$$\psi = 1,8 \cdot \exp \left[-1,8 \cdot \sqrt{\beta \cdot 10^3} / d \right]. \quad (4.9)$$

6. Значение числа Бутакова-Нейкова

$$Bu = 1,5 \cdot \psi \cdot \frac{G_M v_K}{d \cdot 10^{-3} \rho_M F_{жс} g \sum \zeta} \quad (4.10)$$

По данной формуле вычисляется число Bu для вертикальных желобов и для желобов с преобладанием вертикальных участков.

7. Значение критерия Эйлера

$$Eu = \frac{P_y}{\sum \zeta \frac{v_K^2}{2} \rho_s} \quad (4.11)$$

где P_y - разрежение в нижнем укрытии, ρ - плотность отсасываемого воздуха.

При аспирации технологического оборудования с вентилирующей способностью (валковые и молотковые дробилки, дезинтеграторы) необходимо к разрежению в укрытии прибавить величину давления $P_{об}$, создаваемого рабочими органами данного оборудования. В этом случае выражение (4.11) примет следующий вид

$$Eu = 2(P_y + P_{об}) / \rho_s \cdot V_K^2 \cdot \sum \zeta \quad .$$

8. При известных числах Bu и Eu коэффициент скольжения компонентов при равномерно ускоренном потоке сыпучего материала определяется по формуле:

$$\varphi = \sqrt{Eu + \frac{Bu}{3} [1 - \varphi^3 - |n - \varphi|^3]} \quad (4.12)$$

Уравнение (4.12) решается методом последовательных приближений, со следующим начальным приближением

$$\varphi_1 = 0,5 \cdot \left(\frac{1+n}{2} + \sqrt{Eu} \right) \quad (4.13)$$

Если $\varphi_1 < n$, то величина φ определяется из квадратного уравнения, которое следует из выражения (4.13):

$$\varphi = \sqrt{\left(\frac{b}{(2a)^2} \right) + c/a - b/(2a)}, \quad (4.14)$$

где

$$a = 1 - Bu \cdot (1 - n), \quad (4.15)$$

$$b = (1-n)^2 \cdot Bu, \quad (4.16)$$

$$c = Eu + \frac{Bu}{3}(1-n^3). \quad (4.17)$$

9. Расход воздуха, который поступает по желобу в нижнее укрытие, м³/с:

$$Q_{жс} = \varphi \cdot v_k \cdot F_{жс} \cdot (1-\beta)^2. \quad (4.18)$$

10. Расход воздуха, который поступает через неплотности в нижнее укрытие, м³/с:

$$Q_n = 0,65 \cdot F_n \cdot \sqrt{\frac{2P_y}{\rho}}, \quad (4.19)$$

где F_n - площадь неплотностей нижнего укрытия.

11. Транзитный расход воздуха, м³/с:

$$Q_m = \kappa_p \cdot Q_{жс}, \quad (4.20)$$

где κ_p - коэффициент рециркуляции.

Транзитный расход воздуха Q_m показывает, какое количество воздуха перетекает из приемной части укрытия в аспирируемую, из которой, в последствии, удаляется. Транзитный расход Q_m зависит от количества воздуха $Q_{жс}$ поступающего в приемную часть укрытия по желобу. Значение коэффициента рециркуляции κ_p , согласно (4.20) равно отношению транзитного и эжектируемого (поступающего по желобу) воздуха

$$\kappa_p = \frac{Q_m}{Q_{жс}}. \quad (4.21)$$

Можно также определить количество воздуха, идущего на рециркуляцию

$$Q_p = Q_{жс} - Q_m. \quad (4.22)$$

Определить значение транзитного расхода воздуха достаточно сложно. Для упрощения расчета предлагается использовать значения коэффициента рециркуляции на основании полученных экспериментальных значений, выполненных при имитационном моделировании и при перегрузке сыпучего материала, $\kappa_p = 0,4-0,5$ при наличии только байпасной камеры; $\kappa_p = 0,2-0,35$ - при наличии байпасной камеры и перфорации. Данные значения коэффициента

рециркуляции κ_p были получены для оптимальных значений площади сечения байпасной камеры. Согласно экспериментальным исследованиям оптимальное соотношение диаметра байпасного канала к диаметру загрузочной трубы составляет 2-2,5.

При наличии перфорации в сумму к.м.с. $\sum \zeta$ гидравлического тракта системы "верхнее укрытие - желоб - нижнее укрытие" добавляется значение $\zeta_{\text{перф}}$.

12. Расход отсасываемого воздуха:

$$Q_a = Q_m + Q_n. \quad (4.21)$$

Полученные значения расходов воздуха позволят провести гидравлический расчет воздухопроводов аспирационной системы.

4.2. Общие рекомендации по проектированию аспирационной системы

Применение системы аспирации на предприятиях по производству строительных материалов, металлургической, горнорудной промышленности и агропромышленного комплекса требует решения следующих задач.

1. Выбор рациональной конструкции аспирационного укрытия места пылеобразования.
2. Расчёт объёмов отсасываемого воздуха, необходимых для предотвращения выбивания пыли из укрытия.
3. Выполнение гидравлического расчета воздухопроводов.
4. Выбор пылеуловителя для очистки аспирируемого воздуха.

Для конвейерных перегрузок рекомендуется применять разработанную в данной работе конструкцию укрытия, использование которой позволит уменьшить пылеунос, за счет уменьшения количества эжектируемого воздуха, т.к. значительная часть воздуха поступает на рециркуляцию, а это в свою очередь позволит сократить потери ценного материала, удаляемого отсосом.

Рекомендуется использовать разработанное укрытие при производстве сухих строительных материалов (щебень, керамзит), на металлургическом производстве

(при перегрузке окатышей), сельскохозяйственной промышленности (при перегрузках зерновых материалов).

Снижение энергозатрат на эксплуатацию аспирационной системы достигается использованием комбинированного байпасирования и увеличением аэродинамического сопротивления приемной камеры.

Оптимальное отношение диаметра байпасной камеры D_b к диаметру желоба $D_{ж}$, для осуществления эффективной рециркуляции воздуха, является значение 2-2,5. При $D_b/D_{ж} > 2,5$ скорость восходящего рециркулируемого потока воздуха снижается, что может приводить к оседанию пыли на стенках байпасной камеры с последующим ее зарастанием, а это в свою очередь негативно скажется на рециркуляции воздуха. При меньших числах $D_b/D_{ж} < 2$, не смотря на высокую скорость воздуха, в байпасной камере ее гидравлическое сопротивление будет выше, чем при значениях 2-2,5.

Для оптимального осуществления процесса замкнутой циркуляции воздуха, как было сказано ранее, необходимо наличие сопротивления между входным сечением в байпасную камеру и аспирационной воронкой. При высоком сопротивлении байпасной камеры большая часть воздуха будет уходить в аспирируемую камеру с последующим удалением, что будет снижать эффективность байпасирования.

Также обязательно наличие герметизирующих уплотнений на верхнем укрытии аспирационной системы. Их наличие снизит подсос атмосферного воздуха, что приведет к снижению объемов эжектируемого воздуха, что обеспечит наличие дополнительного разрежения в верхнем укрытии и исключит выбивание запыленного циркулируемого воздуха через неплотности верхнего укрытия.

Что касается перфорации, то ее необходимо наносить на стенки желоба в его верхней части. Перфорирование нижней части желоба в области избыточного давления может привести к образованию воздушной завесы при выходе эжектируемого воздуха из отверстий. Такого рода завеса будет оказывать

сопротивление восходящему потоку воздуха при его транзитном перетекании. Если в процессе движения сыпучего материала в загрузочном желобе, эжекционное давление будет снижаться за счет выхода воздуха через перфорацию, то воздушная завеса в нижней части не возникнет, так же как и в случае телескопического желоба (см. рисунок 4.1).

При перфорировании верхней части желоба есть определенные плюсы, некоторые из которых подтверждены экспериментально:

- увеличивается зона разрежения в полости байпасной камеры, т.к. падающий сыпучий материал создает разрежение внутри желоба и циркулируемый воздух через перфорацию устремляется во внутрь;

- при реальных перегрузках сыпучего материала давление по длине желоба увеличивается, и на входе в нижнее укрытие достигает высоких значений, а при наличии перфорации в верхней части увеличения происходить не будет, связано это с тем, что падающий материал будет частично выталкивать воздух через перфорацию, а из-за небольшого давления воздуха внутри желоба образование воздушной завесы будет исключено.

Наличие вертикальной перегородки или внутренних стенок, ограничивающих приемную камеру нижнего укрытия позволяет снизить выбивание запыленного воздуха в рабочую зону помещения, а также играет роль главного сопротивления между аспирационной воронкой и байпасной камерой.

4.3. Методика расчета объемов аспирации перегрузок сыпучего материала на телескопических станциях

Наиболее распространенные конвейерные перегрузки пылящих материалов обычными закрытыми желобами характерны тем, что гравитационные потоки частиц при падении создают эжекционные струи запыленного воздуха, которые поступают в укрытия места падения (места загрузки нижних конвейеров или питателей, бункеров, дробилок, грохотов и другого технологического оборудования).

Для исключения выбивания запыленного воздуха из этих укрытий в окружающую атмосферу осуществляется не только максимально возможное уплотнение данных укрытий, но и отсос воздуха для создания разрежения воздуха в полостях не только нижних укрытий, но и других укрытий, аэродинамически связанных с аспирируемыми укрытиями. Необходимый объем отсасываемого воздуха Q_a (объем аспирации) для простейшего случая перегрузки с конвейера на конвейер, определяется суммой расходов Q_n и $Q_{ж}$, где Q_n - расход воздуха, поступающего в укрытие через неплотности, зависит от площади неплотности (F_n , м²) и величины разрежения, поддерживаемого в укрытии (P_y , Па) для исключения истечения запыленного воздуха.

$$Q_n = \mu F_n \sqrt{2P_y / \rho_0}, \quad (4.24)$$

где $\mu = 1 / \sqrt{\zeta}$ - коэффициент расхода, связанный с коэффициентом местных сопротивлений неплотностей (для малых отверстий $\zeta = 2,4$ и потому $\mu = 0,65$); ρ_0 - плотность окружающего воздуха, часто принимаемая равной 1,2 кг/м³.

Намного сложнее определяется величина расхода воздуха $Q_{ж}$, поступающего по желобу, часто называемого расходом эжектируемого воздуха. Лишь во второй половине прошлого века от эмпирических формул [113-115] перешли к фундаментальным исследованиям нагнетания воздуха по желобам или в свободных струях на основе использования классической теории механики двухкомпонентных потоков и к значительным объемам экспериментальных исследований аэродинамики равноускоренного потока в желобах и струях дискретных частиц [17, 24, 116-119].

В общем виде, расход воздуха перемещаемого по желобу, зависит не только от разрежения в нижнем укрытии (P_y), но и от эжекционного напора ($P_э$, Па), создаваемого за счет аэродинамической силы падающих в желобе частиц, а также от величины теплового напора (P_t , Па), возникающего при теплообмене падающих нагретых частиц и воздуха. В одномерном приближении можно записать:

$$Q_{\text{ж}} = \mu F_{\text{ж}} \sqrt{2(P_y + P_3 + P_T) / \rho} , \quad (4.25)$$

где ρ - плотность воздуха в желобе, кг/м³; $\mu = 1 / \sqrt{\sum \zeta}$ - коэффициент расхода, связанный с суммой к.м.с. желоба, зависящей от геометрии его элементов.

Значительно усложняется расчет эжектируемого воздуха в желобах загрузочных телескопических станций. Загрузочные станции небольшой объемной производительности (до 250 м³/ч), типа ТЗС 500 ЛЕТРАСК, как и телескопические погрузчики значительной производительности (до 1500 м³/ч) типа ПУ-700, получивших применение в морских терминалах, состоят из загрузочных желобов с переменной высотой загрузки, которые представляют собой две соосные трубы. Полость внутренней трубы, по которой перемещается загружаемый материал, аэродинамически связана с полостью ограниченной, непроницаемой наружной стенкой и внутренней проницаемой стенкой. Это обстоятельство способствует организации рециркуляции эжектируемого воздуха, что в количественном отношении отличается от эжекции воздуха в желобе с непроницаемой стенкой.

4.3.1. Методика расчета расхода эжектируемого воздуха в телескопических погрузчиках

В основу этой методики положены экспериментальные данные главы 3 и полученные в главе 2 линеаризованные уравнения динамики эжектируемого воздуха (рисунок 4.1) с одним кольцом рециркуляции воздуха в перфорированном желобе при обычном (схема а) и комбинированном байпасировании (схема б), т.е. с рециркуляцией воздуха по двум кольцам циркуляции, когда эжектируемый по центральному каналу воздух разделяется в нижней части телескопического желоба и поступает в байпасную камеру (внутренняя рециркуляция).

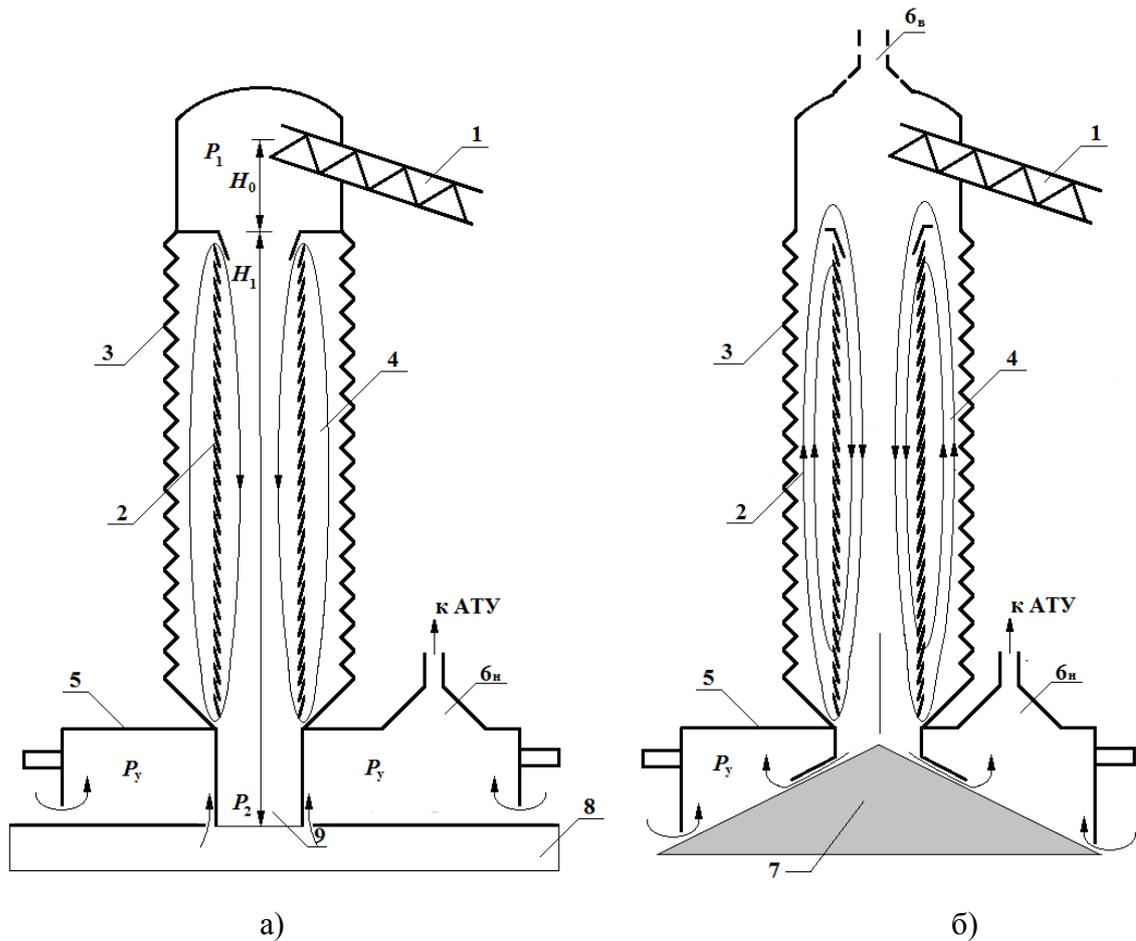


Рисунок 4.1 – Расчетная схема аспирации загрузки закрытого транспортного средства при помощи ТЗС 1000 JETPACK: 1 – загрузочный шнек; 2 – телескопическая труба (желоб); 3 – гофрированная внешняя непроницаемая труба; 4 – байпасная камера с закрытыми (схема а) верхним и нижним днищами и с открытыми (схема б) днищами; 5 – аспирационное укрытие; 6_н – нижний аспирационный патрубок; 6_в - верхний аспирационный патрубок; 7 – штабель зернистого перегружаемого материала; 8 – закрытая емкость; 9 – загрузочная горловина

Транзитный поток воздуха при выходе из желоба разделяется в свою очередь на две ветви: часть воздуха поднимается вверх по байпасной камере (4) в верхнее укрытие (1) (внешняя рециркуляция), а оставшаяся часть с расходом Q_0 поступает через герметизирующие фартуки в аспирируемую камеру, откуда удаляется аспирационным патрубком. Общая производительность патрубков определяется очевидной суммой:

$$Q_a = Q_n + Q_0, \quad (4.26)$$

где Q_n - расход воздуха, поступающего через неплотности внешних уплотняющих фартуков за счет разрежения P_y , создаваемого вентиляторами системы аспирации.

Необходимо определить главное слагаемое балансового уравнения $Q_0 = Q_1$. Для этого следует воспользоваться линеаризованным дифференциальным уравнением (2.26) динамики эжектируемого (нисходящего) потока воздуха в центральном канале при падении в нем всего загружаемого сыпучего материала и восходящего (рециркулируемого по кольцевому каналу) воздуха, расход которого изменяется как за счет перетекания эжектируемого воздуха через зазоры между секциями центрального канала, так и за счет воздуха, перетекаемого по этому каналу из нижней внутренней полости не аспирируемой части укрытия 5 (в эту полость поступает весь перегружаемый материал).

В данном случае для телескопического погрузчика: Ke – безразмерное число (параметр эжекции), представляющий собой отношение максимальных сил эжекционного давления (при $\tilde{v} - \tilde{u} = \tilde{v}_k$) и динамического давления эжектируемого воздуха

$$Ke = \tilde{s}_t \tilde{l} \beta_k \psi \frac{\tilde{F}_M}{\tilde{V}_q} \frac{\tilde{v}_k^2}{2} \tilde{\rho} / \left(\tilde{s}_t \tilde{\rho} \frac{\tilde{v}_k^2}{2} \right) = \psi \beta_k \tilde{l} \frac{\tilde{F}_M}{\tilde{V}_q},$$

β_k - объёмная концентрация частиц в конце падения,

$$\beta_k = \frac{\tilde{G}_r}{\tilde{\rho}_q \tilde{v}_k \tilde{s}_t} = \frac{\tilde{G}_m}{\tilde{\rho}_m \tilde{v}_k \tilde{s}_g},$$

\tilde{v}_k - скорость частиц при выходе из перфорированной трубы, м/с; $\rho_q = \rho_m$ - плотность частицы, кг/м³; $\tilde{s}_t \approx \tilde{s}_g$ - площадь поперечного сечения трубы (желоба),

м²; $\tilde{G}_r = \tilde{G}_m$ - расход перегружаемого материала кг/с; $u = \frac{\tilde{u}}{\tilde{v}_k}$ - безразмерная

скорость воздуха, эжектируемого в телескопической трубе; $x = \frac{\tilde{x}}{l}$ - безразмерная

длина ($0 \leq x \leq 1$); $\tilde{l} = \tilde{H}_1$ - высота телескопической трубы; $P_u = \frac{2\tilde{P}_u}{\tilde{\rho} \tilde{v}_k^2}$; $P_\omega = \frac{\tilde{P}_\omega}{\tilde{\rho} \tilde{v}_k^2 / 2}$ -

безразмерные статические давления в трубе и в байпасной камере; $\tilde{\rho}$ - плотность воздуха, кг/м³; k – линеаризованное отношение безразмерных скоростей, определяемое соотношением идущим сразу после (2.24); $r = \frac{\tilde{S}_\omega}{\tilde{S}_u}$ - отношение площади поперечного сечения кольцевой байпасной камеры к площади поперечного сечения телескопической трубы. Поскольку это отношение постоянно по высоте перегрузочного желоба, то можно записать следующую константу

$$z = u - r\omega = u_n - r\omega_k, \quad (4.27)$$

связанную с расходом транзитного воздуха \tilde{Q}_1 , м³/с (см. формулу после (2.3))

Усреднение скорости падения частиц и эжектируемого воздуха по высоте телескопической трубы обозначается чертой над величиной. Для скорости частиц \bar{v} , скорости воздуха $\bar{u}, \bar{\omega}$ (последняя обозначает усредненную скорость восходящего потока воздуха в кольцевой байпасной камере).

Буквы, обозначающие физические и геометрические параметры с верхней волнистой линией (тильдой) представляют собой размерные величины, без этой волнистой линии – безразмерные величины этих параметров, а с верхней горизонтальной чертой – величины безразмерных параметров, усредненных по высоте падения частиц (по высоте перфорированной центральной трубы $\tilde{l} = \tilde{H}_1$, м). Отношение площади миделева сечения частиц к их объему:

$$\frac{\tilde{F}_M}{\tilde{V}_ч} = \frac{\pi \tilde{D}_e^2}{4} / \frac{\pi \tilde{D}_e^3}{6} = \frac{1,5}{\tilde{D}_e}, \quad (4.28)$$

\tilde{D}_e - эквивалентный диаметр частиц, м (иногда измеряется в мм и обозначается $\tilde{d}_e = \tilde{D}_e \cdot 10^3$).

Тогда

$$\frac{\tilde{F}_M}{\tilde{V}_ч} = \frac{1500}{\tilde{d}_e} \quad (4.29)$$

и

$$Ke = \frac{\psi \beta_k H_1 1500}{d_e}. \quad (4.30)$$

Коэффициент лобового сопротивления ψ , как показали многочисленные исследования аэродинамики перегрузок монофракционных материалов по закрытым желобам (по каналам постоянного сечения с непроницаемыми стенками) [17], уменьшается с увеличением усредненной объемной концентрации

$$\psi = \psi_0 \exp\left[-1,8\sqrt{\beta_y 10^3 / d_e}\right] = \psi_0 \exp\left[-56,92\sqrt{\beta_y / d_e}\right], \quad (4.31)$$

где ψ_0 - коэффициент лобового сопротивления одиночной частицы (для зерен злаков $\psi_0 \approx 1,2$).

Существуют и другие важные параметры линеаризованных уравнений (2.26). Безразмерные статические давления в нисходящем потоке эжектируемого воздуха (P_u) и в восходящем потоке рециркулируемого воздуха в кольцевом канале (P_ω):

$$P_u = P(x) = \frac{2\tilde{P}_u}{\tilde{\rho}\tilde{v}_k}; \quad P_\omega = \frac{2\tilde{P}_\omega}{\tilde{\rho}\tilde{v}_k}, \quad (4.32)$$

где $\tilde{P}_u, \tilde{P}_\omega$ - размерные статические давления, Па; $\tilde{\rho}$ - плотность воздуха, кг/м³; \tilde{v}_n, \tilde{v}_k - скорости падающих частиц в начале и в конце телескопического желоба, м/с.

Учитывая относительно не большую высоту падения перегружаемого материала, высокую плотность частиц ($\tilde{\rho}_m \geq \tilde{\rho}_c$) и малую силу аэродинамического сопротивления, можно полагать поток падающих в трубе частиц равноускоренным, т.е.

$$\tilde{v} = \sqrt{\tilde{v}_n^2 + 2\tilde{g}\tilde{x}}, \quad (4.33)$$

где \tilde{v}_n - скорость частиц при входе в телескопическую трубу, м/с; \tilde{x} - высота падения частиц (от начала трубы).

С целью дальнейшего упрощения интегрирования системы дифференциальных уравнений (2.26), ускорение потока частиц считается величиной переменной, а безразмерная скорость определяется квадратным

трехчленом (см. параграф 2.3): $v = b_0 + b_1x + \frac{b_2}{2}x^2$, где коэффициенты b_0, b_1, b_2 определяются из условия равенства скорости условного потока и скорости равноускоренного потока, определяемой в соответствии с формулой (4.33), в трех реперных точках - в начале, по середине и в конце трубы. Такая привязка позволяет минимизировать отклонения кинематики условного потока частиц от равноускоренного.

Отметим, что безразмерная величина $x = \frac{\tilde{x}}{\tilde{l}_1} = \frac{\tilde{x}}{\tilde{H}_1}$ изменяется в отрезке $0 \leq x \leq 1$.

В этом случае усредненная скорость условного потока будет иметь вид:

$$\bar{v} = v_s = \int_0^1 v dx = b_0 + \frac{1}{2}b_1 + \frac{1}{6}b_2. \quad (4.34)$$

Для замыкания исходной системы дифференциальных уравнений (2.26) используется, как и ранее в главе 2, уравнение динамики перетекаемого воздуха в зазорах между секциями телескопической трубы: $p_o - p_u = \zeta_0 |w| w \approx \zeta_0 \overline{|w|} w$.

В данном случае

$$\frac{du}{dx} = \frac{\tilde{S}_o}{\tilde{S}_u} w; \quad \tilde{S}_o = N_g \tilde{f}_{zo}, \quad \tilde{f}_{zo} = \pi \tilde{D}_1 \frac{\tilde{d}_1 - \tilde{d}_2}{2}, \quad (4.35)$$

где $\tilde{S}_u = \frac{\pi \tilde{D}_1^2}{4}$ - площадь поперечного сечения желоба, м²; $\tilde{S}_o \equiv \tilde{S}_z$ - суммарная площадь всех зазоров, м²; $\tilde{D}_1 = \frac{\tilde{d}_1 + \tilde{d}_2}{2}$ - условный диаметр желоба, м; \tilde{d}_1 - диаметр верхнего основания секции телескопической трубы, м; \tilde{d}_2 - диаметр нижнего ($\tilde{d}_2 < \tilde{d}_1$) основания этой секции, м; \tilde{f}_{zo} - площадь одного зазора, м²; N_g - число секций в телескопической трубе, шт.

С учетом этих обозначений, приближенное уравнение динамики перетекаемого воздуха в зазорах имеет вид (2.25). Дальнейшее построение методики ведется с использованием формул (2.26) и (2.27).

Усредненные в интервале $x = 0 \dots 1$ скорости $\bar{u}, \bar{\omega}, \bar{w}$ в первом приближении определяются при помощи формул из монографии [24]:

$$u_s = v_s - u_n \sqrt{\frac{\sum \zeta \cdot v_s}{Le}}; \quad (4.36)$$

$$\omega_s = \frac{u_s - u_n}{r}; \quad (4.37)$$

$$w_s = \sqrt{\frac{|0,25 - \zeta_k| + 0,25 + \zeta_n}{3\zeta_o}}, \quad (4.38)$$

где $\sum \zeta = \zeta_n + \zeta_k$; $\zeta_o = 1,5$; $\zeta_n = 2,4 \left(\frac{S_g}{S_{mw}} \right)^2 + 0,5$; $\zeta_k = 1 + 2,4 \left(\frac{S_g}{S_{nk}} \right)^2$.

Таким образом, общая задача комбинированного байпасирования рассматриваемого телескопического желоба погрузочного узла сводится к решению системы двух дифференциальных уравнений (2.28) в безразмерном виде с краевыми условиями (2.7) – (2.12) и учетом (2.13), (2.14), где $\tilde{f}_1 = S_{mw}$ - площадь неплотностей верхнего укрытия, m^2 ; $\tilde{f}_p = S_{nk}$ - площадь зазора между стенками приёмной камеры нижнего укрытия и штабелем выгруженного зерна, m^2 .

Расчетный объем аспирации от нижнего укрытия при найденной величине z определяется суммой расхода транзитного воздуха, поступающего по телескопической трубе

$$\tilde{Q}_1 = z \tilde{v}_k \tilde{S}, \quad m^3/c, \quad (4.39)$$

и расхода воздуха, поступающего через неплотности наружных стенок аспирируемой нижней камеры (\tilde{f}_2 , m^2), за счет разрежения в укрытии (\tilde{P}_y , Па):

$$\tilde{Q}_n = \tilde{f}_2 \sqrt{\frac{2\tilde{P}_y}{\zeta_o \rho_o}}, \quad (4.40)$$

где $\rho_o \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность окружающего воздуха; $\tilde{P}_y \approx 10$ Па – нормируемая величина разрежения; $\zeta_o \approx 2,4$ - к.м.с. неплотности наружных стенок нижнего укрытия.

Далее методика расчета строится на основании использования уравнений (2.29)-(2.32).

Для того чтобы решить замкнутую систему уравнений (2.31), (2.32) и определить искомые три неизвестные u_n, u_k, z необходимо знать усредненные по длине телескопического погрузчика скорости $\bar{u} \equiv u_s, \bar{w} \equiv w_s, \bar{\omega} \equiv \omega_s$.

Усредненная в интервале $x=0...1$ скорость u_s в соответствии с уравнением (4.62) определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{u} \equiv u_s = C_1 \int_0^1 e^{a_1 x} dx + C_2 \int_0^1 e^{a_2 x} dx + \int_0^1 (v - k_1 - k_2 x) dx = \\ \frac{C_1}{a_1} (e^{a_1} - 1) + \frac{C_2}{a_2} (e^{a_2} - 1) + b_0 + \frac{b_1 - k_2}{2} + \frac{b_2}{6} - k_1. \end{aligned} \quad (4.41)$$

Усредненная в том же интервале скорость w_s определяется также как и в главе 2 (стр.62-63).

Подставляя найденные усредненные значения скоростей u_s, w_s в уравнения (2.31), (2.32) получим замкнутую систему трех уравнений с тремя неизвестными u_n, u_k, z .

После определения величины z и при помощи соотношений (4.39) и (4.40) для расходов транзитного воздуха Q_1 и воздуха, поступающего через неплотности камеры - Q_n , определяется объём аспирации по формуле (4.26).

Далее более подробно рассмотрена методика расчета производительности местного отсоса наиболее распространённого телескопического погрузчика ТЗС1000 JETPASK, с возможностью организации рециркуляции воздуха в байпасной камере, осуществляемой только за счет перетекания воздуха через зазоры между секциями телескопического желоба (рисунок 4.1а).

В силу очевидного равенства расходов перетекаемого воздуха

$$Q_p = \int_0^{x_m} w \pi d_1 dx = \int_{x_m}^1 w \pi d_1 dx, \quad (4.42)$$

где x_m - расстояние от начала желоба до сечения с максимальным расходом эжектируемого воздуха в желобе и рециркулируемого в байпасной камере, рассмотренные ранее граничные соотношения (2.7), (2.9) значительно упрощаются, в соответствии с тем что

$$u_n \equiv u_k \equiv u_0, \quad (4.43)$$

$$\omega_n \equiv \omega_k \equiv 0, \quad (4.44)$$

$$P_{\omega n} \equiv P_{\omega k} \equiv P_a, \quad (4.45)$$

P_a - безразмерное давление у верхнего и нижнего днища байпасной камеры.

Изменяются при этом и граничные условия для давлений:

$$p(0) = -(\zeta_{nw} + 0,5)u_n^2, \quad (4.46)$$

$$p(1) = (1 + \zeta_{nk})u_n^2 + p_y, \quad (4.47)$$

где

$$\zeta_{nw} = 2,4 \left(\frac{S_g}{S_{nw}} \right)^2; \quad \zeta_{nk} = 2,4 \left(\frac{S_g}{S_{nk}} \right)^2 \quad (4.48)$$

к.м.с. входа эжектируемого воздуха в загрузочный жёлоб и выхода из него в приёмную камеру, роль которой может выполнить приемное транспортное средство, аэродинамически связанное с аспирационным укрытием.

Усредненные значения скорости эжектируемого воздуха в желобе определяются путем интегрирования исходного уравнения (2.5) по длине желоба (в пределах $x = 0 \dots 1$):

$$\int_0^1 dp_u(x) + 4\bar{u} \int_0^1 du(x) - kKe \int_0^1 [v(x) - u(x)] dx = 0, \quad (4.49)$$

откуда в силу (4.43), (4.46), (4.47) и (4.48) следует уравнение:

$$\zeta_p u_n^2 + p_y = kKe(\bar{v} - \bar{u}), \quad (4.50)$$

где ζ_p - сумма к.м.с.:

$$\zeta_p = 1 + \zeta_{nk} + \zeta_{nw} + 0,5, \quad (4.51)$$

p_y - безразмерное разрежение в аспирируемом укрытии (обычно для перегрузок сыпучих материалов $\tilde{P}_y = 6 - 10$ Па) :

$$p_y = -\frac{2\tilde{P}_y}{\tilde{\rho}v_k^2}, \quad (4.52)$$

$\bar{v} \equiv v_s$ - усредненная безразмерная скорость падения частиц в телескопическом желобе, определяемая по формуле (4.34).

Таким образом, из (4.50) следует формула для определения усредненной скорости:

$$\bar{u} = \bar{v} - \frac{\zeta_p u_n^2 + p_y}{k\text{Ke}}. \quad (4.53)$$

В программе эта формула, с учетом выражения для k (см. расшифровку формулы (2.24)) в новых обозначениях $\bar{u} \equiv u_s$, $\bar{v} \equiv v_s$ имеет следующий вид:

$$u_s = v_s - \sqrt{\frac{v_s u_n^2 \zeta_p + p_y}{\text{Ke}}}. \quad (4.54)$$

Усредненная скорость перетекания воздуха через зазоры между секциями телескопического желоба определяется с учетом равенства

$$w|_{x=x_m=0}, \quad (4.55)$$

в сечении, где наблюдается максимальная скорость эжектируемого воздуха (u_m), т.е. предполагалось что

$$w_s = \frac{w(0) + w(x_m) + w(1)}{3}, \quad (4.56)$$

где в силу (4.44)

$$w(0) = \frac{|P_a - P(0)|}{\zeta_0 w_s}, \quad w(1) = \frac{|P_a - P(1)|}{\zeta_0 w_s}, \quad (4.57)$$

P_a - избыточное давление у верхнего и нижнего днища байпасной камеры [24]:

$$P_a \approx 0,25u_0^2. \quad (4.58)$$

и тогда для абсолютного значения w_s можем записать, с учетом (4.46), (4.47) и (4.58), пренебрегая величиной p_y :

$$w_s = u_n \sqrt{\frac{0,25 + \zeta_n + |0,25 - \zeta_k|}{3\zeta_0}}, \quad (4.59)$$

где

$$\zeta_n = \zeta_{nw} + 0,5; \quad \zeta_k = 1 + \zeta_{nk}. \quad (4.60)$$

Из условия неразрывности смежных потоков воздуха (эжектируемого в трубе и восходящего в байпасной камере)

$$\bar{\omega} = \frac{u - u_0}{r} \quad (4.61)$$

определяется усредненная величина скорости восходящего потока (4.37):

$$\bar{\omega}_s = \frac{u_s - u_0}{r}. \quad (4.62)$$

Решение уравнения (2.28) имеет вид (2.29):

$$u = C_1 e^{a_1 x} + C_2 e^{a_2 x} + b_0 - k_1 + x(b_1 - k_2) + \frac{b_2}{2} x^2. \quad (4.63)$$

В силу изменившихся граничных условий (4.43) система уравнений после формулы (2.30) примет другой вид:

$$\begin{cases} u_0 = C_1 + C_2 + n - k_1, & n = \tilde{v}_n / \tilde{v}_k \\ u_0 = C_1 e^{a_1} + C_2 e^{a_2} + 1 - k_1 - k_2, \end{cases} \quad (4.64)$$

решение которой определяется из выражений:

$$C_1 = u_0 \frac{1 - e^{a_2}}{e^{a_1} - e^{a_2}} - \frac{b_3 - a_3 e^{a_2}}{e^{a_1} - e^{a_2}}; \quad C_2 = u_0 \frac{e^{a_1} - 1}{e^{a_1} - e^{a_2}} - \frac{a_3 e^{a_1} - b_3}{e^{a_1} - e^{a_2}}, \quad (4.65)$$

где для простоты записи принято

$$a_3 = n - k_1; \quad b_3 = 1 - k_1 - k_2. \quad (4.66)$$

После дифференцирования уравнения (4.63) оно примет вид (2.30).

Уравнение, связывающее давление (p) в телескопическом желобе со скоростью эжектируемого потока (u) и усредненной скоростью перетекания воздуха (\bar{w}) [24] имеет вид:

$$p = p_a - 4\bar{\omega} \frac{u - u_0}{r} - \frac{\sqrt{\zeta_0}}{E} |\bar{w}| \frac{du}{dx}. \quad (4.67)$$

С помощью этого уравнения определяется величина давлений $p(0)$ и $p(1)$ в начале и в конце желоба с учетом (4.46), (4.47), (4.60):

$$p(0) \equiv -\zeta_n u_n^2 = p_a - \frac{\sqrt{\zeta_0}}{E} |\bar{w}| (C_1 a_1 + C_2 a_2 + b_1 - k_2), \quad (4.68)$$

$$p(1) \equiv \zeta_k u_n^2 + p_y = p_a - \frac{\sqrt{\zeta_0}}{E} |\bar{w}| (C_1 a_1 e^{a_1} + C_2 a_2 e^{a_2} + b_1 - k_2 + b_2). \quad (4.69)$$

При вычитании первого уравнения этой системы из второго, получается следующее уравнение:

$$\zeta_p u_n^2 + p_y = -\frac{\sqrt{\zeta_0}}{E} |\bar{w}| (C_1 a_1 (e^{a_1} - 1) + C_2 a_2 (e^{a_2} - 1) + b_2). \quad (4.70)$$

Это уравнение даст возможность найти величину $u_n \equiv u_0$ в силу того, что константы C_1, C_2, a_1, a_2 являются функциями искомой величины (решение возможно осуществить только численно).

Определив u_n и вычислив упомянутые константы можно найти величину безразмерного избыточного давления p_a у стенок днища байпасной камеры по следующей формуле:

$$p_a = 0,5((\zeta_k - \zeta_n)u_n^2 + p_y) + w_s \frac{\sqrt{\zeta_0}}{2E} [C_1 a_1 (1 + e^{a_1}) + C_2 a_2 (1 + e^{a_2}) + a_4 + b_4], \quad (4.71)$$

$$a_4 = b_1 - k_2, \quad b_4 = b_1 + b_2 - k_2,$$

полученной сложением уравнений (4.68) и (4.69).

Теперь можно проинтегрировать правую часть (4.63) в пределах $x=0\dots 1$ и найти уточненную величину усредненной скорости u_s . А решив уравнение $u'(x)=0$ в силу соотношения (2.30) определятся в интервале $x=0\dots 1$ значения $x = x_m$, при котором находится максимальная скорость эжектируемого воздуха u_m . Это дает возможность найти максимальный объемный расход эжектируемого воздуха в этом сечении:

$$Q_m = 3600u_m v_k S_g, \quad (4.72)$$

максимальный расход рециркулируемого воздуха

$$Q_R = 3600(u_m - u_n)v_k S_g \quad (4.73)$$

и расход транзитного воздуха

$$Q_1 \equiv Q_o = Q_m - Q_R = 3600u_n v_k S_g. \quad (4.74)$$

Таким образом, определение u_n , P_a и констант $C_1, C_2, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, k_1, k_2$ дает возможность не только найти конечные результаты Q_m, Q_R, Q_o , но и исследовать функции для скорости эжектируемого воздуха $u(x)$ используя соотношение (4.63). Давление в байпасной камере с учетом (4.61) определяется из следующего выражения:

$$p_\omega(x) = p_a - 4\omega\bar{\omega} = p_a - 4(u(x) - u_n)\bar{\omega} / r, \quad (4.75)$$

а для давления в желобе с учетом (2.30), (4.67) :

$$p(x) = p_\omega - \frac{\sqrt{\zeta_o |\bar{w}|}}{E} (C_1 a_1 e^{a_1} + C_2 a_2 e^{a_2} + b_1 - k_2 + b_2 x). \quad (4.76)$$

Разность этих давлений

$$\Delta p(x) = p_\omega(x) - p(x) \quad (4.77)$$

определяет скорость перетекания воздуха через стенки желоба

$$w(x) = \frac{\Delta p(x)}{\zeta_o w_s}. \quad (4.78)$$

4.3.2. Структура программы расчета объемов аспирации телескопического погрузчика

Изложенные в п. 4.3.1 расчетные формулы и трансцендентные уравнения в силу их громоздкости требуют численных методов решения, например, в

универсальной математической среде Maple-13 (приложение А). Использование этой среды для программирования намного проще классических языков программирования и не требует сложных схем алгоритмов и промежуточных расчетов. Ниже приведенная программа (приложение А), состоит из двух частей с очевидной схемой последовательных расчетов по соответствующим формулам.

Целью первой части программы является определение транзитного объема эжектируемого воздуха по телескопическому желобу ($Q_0 \equiv Q_1$). Она состоит из 6 блоков. В первом блоке приведены технологические, геометрические и конструктивные параметры телескопического погрузочного узла и аспирационных укрытий.

Во втором блоке включены следующие основные параметры:

- объемная концентрация падающих частиц в конце телескопического желоба

$$\beta_k = \frac{G_m}{v_k \rho_m S_g};$$

по середине этого желоба (усредненная концентрация)

$$\beta_k = \frac{2G_m}{v_k (1+n) \rho_m S_g};$$

по формуле (4.31) определяется средний коэффициент лобового сопротивления падающих частиц;

по формуле (4.30) определяем параметр эжекции Ke ;

по формуле (4.41), где коэффициенты определяются по формулам $b_0 = n; b_1 = \sqrt{8(1+n^2)} - 3n - 1; b_2 = 4(1+n - \sqrt{2(1+n^2)})$, где $n = \tilde{v}_n / \tilde{v}_k$ определяется усредненная скорость падения частиц в телескопической трубе $\bar{v} \equiv v_s$;

по формулам (4.36), (4.59), (4.62), определяются осредненные скорости эжектируемого воздуха в телескопическом желобе (u_s), скорости восходящего рециркулируемого воздушного потока в байпасном канале (ω_s) и скорости воздуха, перетекаемого из желоба через отверстия боковой стенки камеры (w_s).

В блоке 3 приведено решение линейного уравнения из системы (2.28), определяются коэффициенты A и B по формуле (2.27) и следующей за ней; корни характеристического уравнения a_1, a_2 и постоянные параметры k_1, k_2 по формулам, следующим за (2.30); по формулам (4.65) константы C_1, C_2 путем решения системы уравнений (4.64).

В блоке 4 определяются путем решения трансцендентного уравнения (4.70) скорости эжектируемого воздуха при входе (и выходе) в телескопический желоб (u_n); приводится уравнение (4.63) для расчета скорости $u(x)$ (в произвольных сечениях желоба) на отрезке $x = 0 \dots 1$; затем интегрированием функции $u(x)$ на том же отрезке определяется средняя скорость u_s ; дифференцируется функция $u(x)$ и находится сечение x_m , путем решения уравнения $u'(x_m)$ (2.30), и рассчитывается максимальная величина скорости эжектируемого воздуха u_m по формуле $u_m = u(x)|_{x=x_m}$; определяются максимальные объемные расходы воздуха в сечении $x = x_m$ (в телескопическом желобе Q_m по формуле (4.72), рециркулируемом в байпасной камере Q_R по формуле (4.73) и разность этих расходов – т.е. величину $Q_o \equiv Q_1$).

Завершается этот блок программы вычислением избыточного давления на днище байпасной камеры p_a в соответствии с формулой (4.71).

В 5-м блоке выполняются с шагом $x = 0,1$ (на интервале $x = 0 \dots 1$) расчёты следующих функций: $u(x)$ по формуле (4.63), $p_o(x)$ по формуле (4.75), $p(x)$ по формуле (4.76); $w(x)$ по формуле (4.78) с учетом найденных $p(x)$, $p_o(x)$ и разности давлений по формуле $\Delta p(x) = -p(x) + p_o(x)$. В конце блока приведен расчет скорости эжектируемого воздуха (u_2) и его расход (Q_2) для случая полной герметизации стенок желоба (т.е. при отсутствии рециркуляции воздуха в байпасной камере) по формуле для обычных (герметичных) желобов [17]:

$$\frac{3u_2^2}{|1-u_2|^3 - |n-u_2|^3} = \frac{2Ke}{(\zeta_p + p_y)(1-n^2)}; \quad (4.79)$$

$$Q_a = 3600u_2v_kS_g. \quad (4.80)$$

В блоке 6 приведены для анализа изменения вышеупомянутых функций в первом столбце значения аргумента $x = 0; 0,1; 0,2 \dots 1$, во втором величина $u(x)$, в третьем - $w(x)$, в четвертом - $p(x)$, в пятом - $p_\omega(x)$ и в шестом $\Delta p(x)$.

Вторая завершающая часть программы посвящена вычислению: расхода воздуха, поступающего из желоба в аспирируемое укрытие - Q_g (блок 7); расхода воздуха, поступающего в это же укрытие через неплотности - Q_n (блок 8) и необходимого расхода воздуха, удаляемого из аспирационного укрытия $Q_a = Q_g + Q_n$ (блок 9).

4.3.3. Изменение аэродинамических параметров эжектирования воздуха в желобах телескопических погрузчиков

В качестве объекта численных исследований процессов аспирации в этом параграфе рассмотрен пример загрузки гранулированного сыпучего материала крупностью $d_e = 5$ мм и плотностью $\rho_m = 1800$ кг/м³ с помощью телескопической загрузочной станции ТЗС 1000 JETPASC. Технологические, конструктивные и аэродинамические исходные данные приведены в программе – блок 1 «Исходные данные». В качестве основного изменяющегося параметра принята степень герметизации верхнего (не аспирируемого) укрытия – площадь неплотностей S_{nw} . Этот параметр существенным образом сказывается на скорости и, следовательно, на расход воздуха, эжектируемого в телескопическом желобе и рециркулируемого в байпасной камере не только за счет разрежения p_y , поддерживаемого в аспирируемом укрытии вентилятором аспирационной установки.

Прежде всего, это наглядно видно из сопоставления графиков изменения скорости воздуха $u(x)$, $w(x)$ на рисунке 4.2. Максимумы этих скоростей при уменьшении площади неплотностей S_{nw} смещаются к началу телескопического желоба. Направление перетекаемого рециркулируемого воздуха через зазоры

между конечными секциями желоба остается прежним: в начальном сечении ($x = 0$) перетекание осуществляется из байпасной камеры в желоб, а в конечном ($x = 1$) – из желоба в камеру.

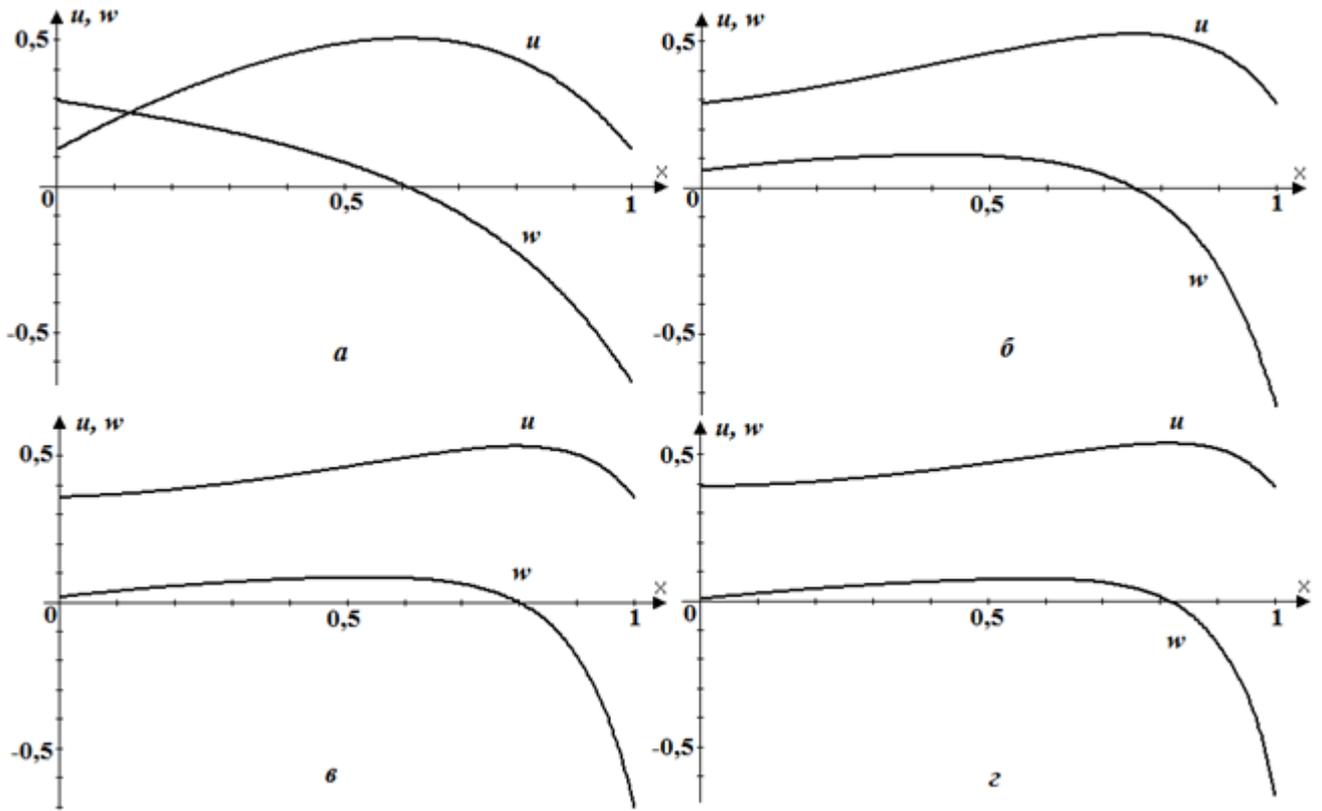


Рисунок 4.2 – Изменение безразмерных скоростей эжектируемого воздуха $u(x)$ и скоростей перетекания воздуха $w(x)$ через зазоры между секциями желоба по высоте падения частиц ($x = 0 \dots 1$) при условном диаметре желоба $D_1 = 0,33$ м; $D_n = 0,45$ м; $H_1 = 4$ м; $Ke = 3,542$:

$$\text{а) } S_{nw} = 0,02 \text{ м}^2; \text{ б) } S_{nw} = 0,06 \text{ м}^2; \text{ в) } S_{nw} = 0,1 \text{ м}^2; \text{ г) } S_{nw} = 0,14 \text{ м}^2$$

Причем скорость перетекания в начальном сечении увеличивается с повышением степени герметизации верхнего укрытия (при $S_{nw} \rightarrow 0,02 \text{ м}^2$). Центр вихря рециркулируемого воздуха смещается к началу желоба. Если центр этого вихря лежит в сечении $x_m = 0,82$ при $S_{nw} = 0,14 \text{ м}^2$, то при $S_{nw} = 0,02 \text{ м}^2$ он перемещается в сечение $x_m = 0,64$. Такое «слабое» смещение объясняется уменьшающимся к концу желоба действием аэродинамических сил

(эжекционного давления) ускоренно падающих частиц перегружаемого материала.

Отмеченные смещения вихря рециркуляции к началу желоба объясняются ростом разрежения $p(x)$ в начальном сечении $p(0)$ при снижении площади неплотностей верхнего укрытия (рисунок 4.3) и ростом к.м.с. этого укрытия (от $\zeta_{nw} = 0,896$ при $S_{nw} = 0,14 \text{ м}^2$ до $\zeta_{nw} = 43,9$ при $S_{nw} = 0,02 \text{ м}^2$). Причем зона разрежения при малых площадях неплотностей $S_{nw} \geq 0,04 \text{ м}^2$ захватывает и конечное сечение желоба ($p(1) = -0,12$ при $S_{nw} = 0,02 \text{ м}^2$).

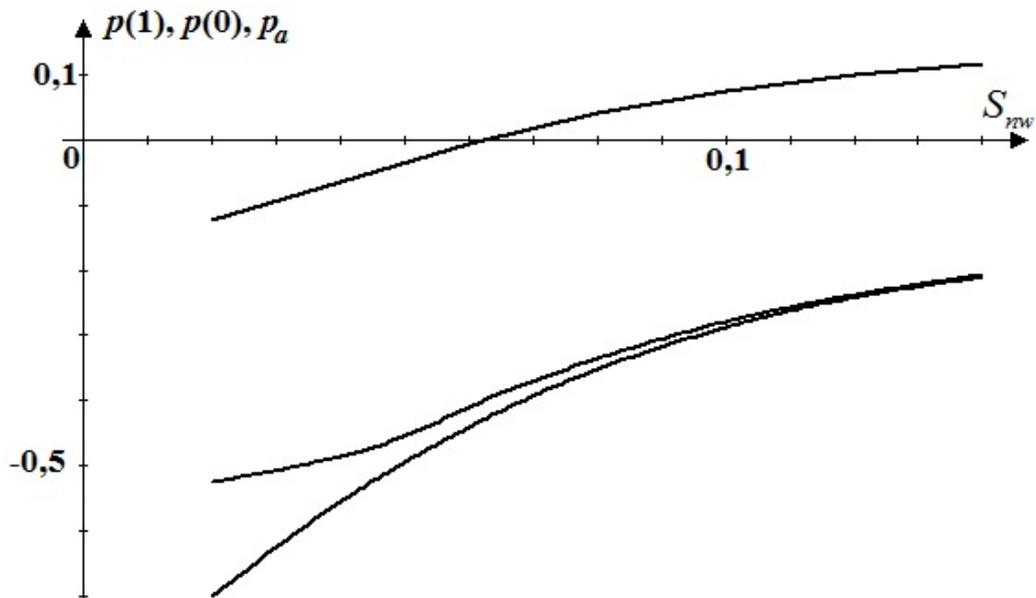


Рисунок 4.3 – Изменение безразмерных давлений в начале $p(0)$, в конце $p(1)$ телескопического желоба и у днища байпасной камеры p_a при увеличении площади неплотностей S_{nw} верхнего не аспирируемого укрытия при условном диаметре желоба $D_1 = 0,33 \text{ м}$; $D_n = 0,45 \text{ м}$; $H_1 = 4 \text{ м}$;
 $Ke = 3,542$

Смещение зоны разрежения оказывает влияние не только на геометрию вихревой рециркуляции, но и на мощности (расходы) воздушных течений (рисунок 4.4). Так резко возрастают расходы рециркулируемого воздуха при снижении S_{nw} , с $Q_r / Q_1 = 0,4$ при $S_{nw} = 0,14 \text{ м}^2$ до $Q_r / Q_1 = 3,0$ при $S_{nw} = 0,02 \text{ м}^2$. Рост относительного расхода воздуха $Q_n / Q_1 = 0,4$, поступающего через неплотности нижнего аспирируемого укрытия происходит не потому, что

изменяется Q_n (он для нашего случая $Q_n = 1273 \text{ м}^3/\text{ч} - \text{const}$), а потому что уменьшается расход транзитного воздуха Q_1 с уменьшением S_{nw} (в силу большого вышеупомянутого к.м.с. $\zeta_{nw} = 43,9$). По этой причине растет и относительный расход аспирируемого воздуха Q_a / Q_1 , максимальный расход рециркулируемого воздуха Q_m / Q_1 , относительный расход эжектируемого воздуха при герметичных стенках желоба Q_2 / Q_1 . Рост упомянутых расходов, прежде всего, объясняется увеличением расхода рециркулируемого воздуха (с $Q_n = 447 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $S_{nw} = 0,14 \text{ м}^2$ до $Q_n = 1137 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $S_{nw} = 0,02 \text{ м}^2$) и уменьшением транзитного воздуха (с $Q_1 = 1185 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $S_{nw} = 0,14 \text{ м}^2$ до $Q_1 = 383 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $S_{nw} = 0,02 \text{ м}^2$).

Из сопоставления абсолютных величин расходов (рисунок 4.5), следует, что с увеличением площади неплотностей верхнего укрытия резко изменяются расход рециркулируемого воздуха Q_r и расход транзитного воздуха в желобе Q_1 , а именно объемный расход Q_r снижается более чем в два раза, а расход Q_1 увеличивается в три раза в диапазоне $S_{nw} = 0,02 \div 0,14 \text{ м}^2$.

Расход транзитного эжектируемого воздуха Q_1 за счет рециркуляции воздуха при перетекании воздуха в байпасную камеру заметно ниже, чем расход эжектируемого воздуха в желобе при отсутствии рециркуляции воздуха Q_2 , т.е. в случае герметизации стенок этого желоба), а именно в $2,84 \div 1,16$ раза в диапазоне $S_{nw} = 0,02 \div 0,14 \text{ м}^2$. В силу этого уменьшается и требуемая производительность местного отсоса Q_a по сравнению с производительностью местного отсоса от перегрузки по желобу с герметичными стенками $Q_{2a} = Q_2 + Q_n$ в $1,57 \div 1,08$ раза в диапазоне $S_{nw} = 0,02 \div 0,14 \text{ м}^2$.

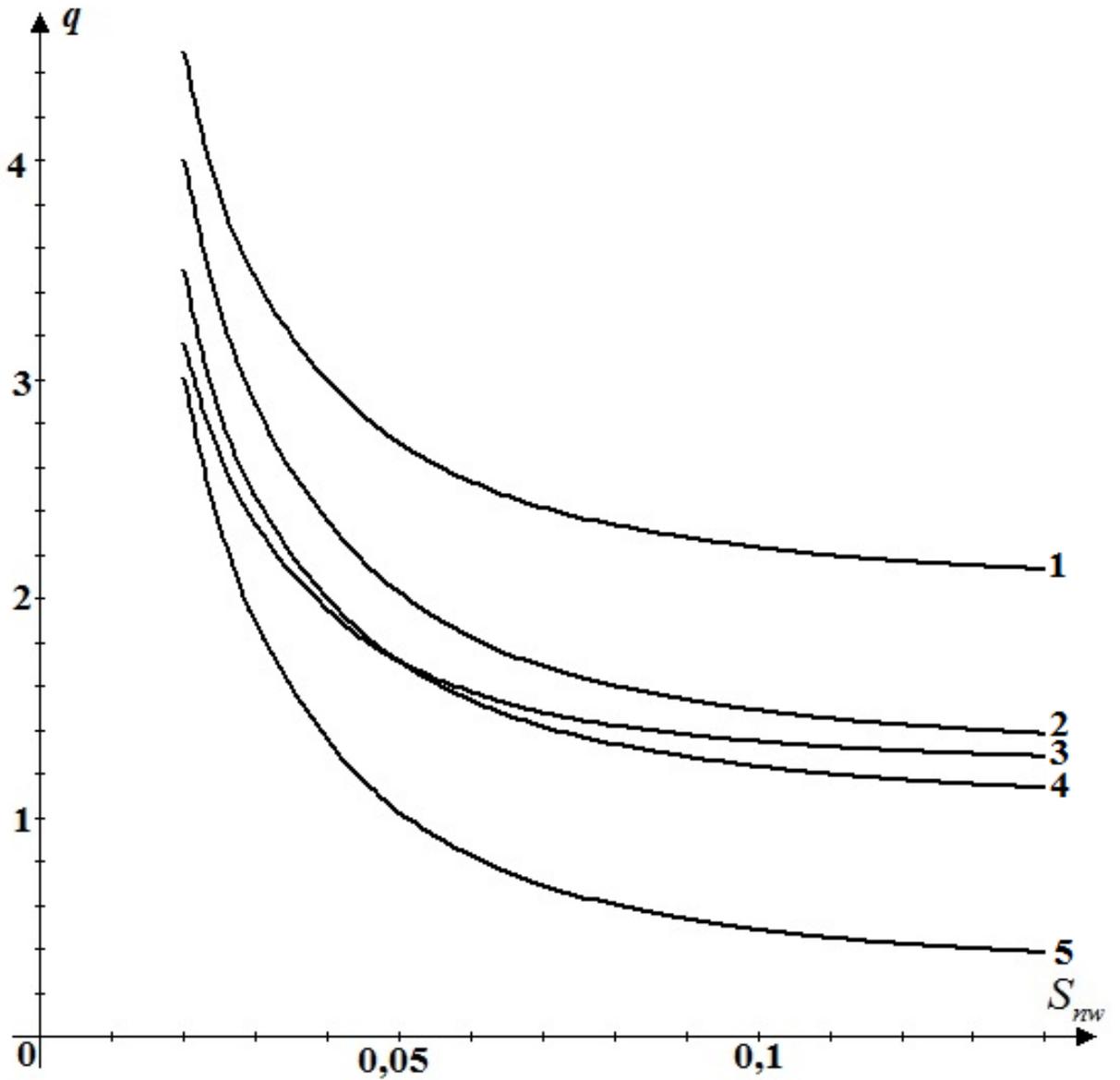


Рисунок 4.4 – Изменение относительных расходов q : 1 – аспирируемого из нижнего укрытия Q_a / Q_1 ; 2 – максимального эжектируемого по телескопическому желобу Q_m / Q_1 ; 3 – эжектируемого воздуха при отсутствии зазоров в стенках желоба Q_2 / Q_1 ; 4 – поступающего через неплотности аспирационного укрытия Q_n / Q_1 ; 5 – рециркулируемом в желобе Q_r / Q_1

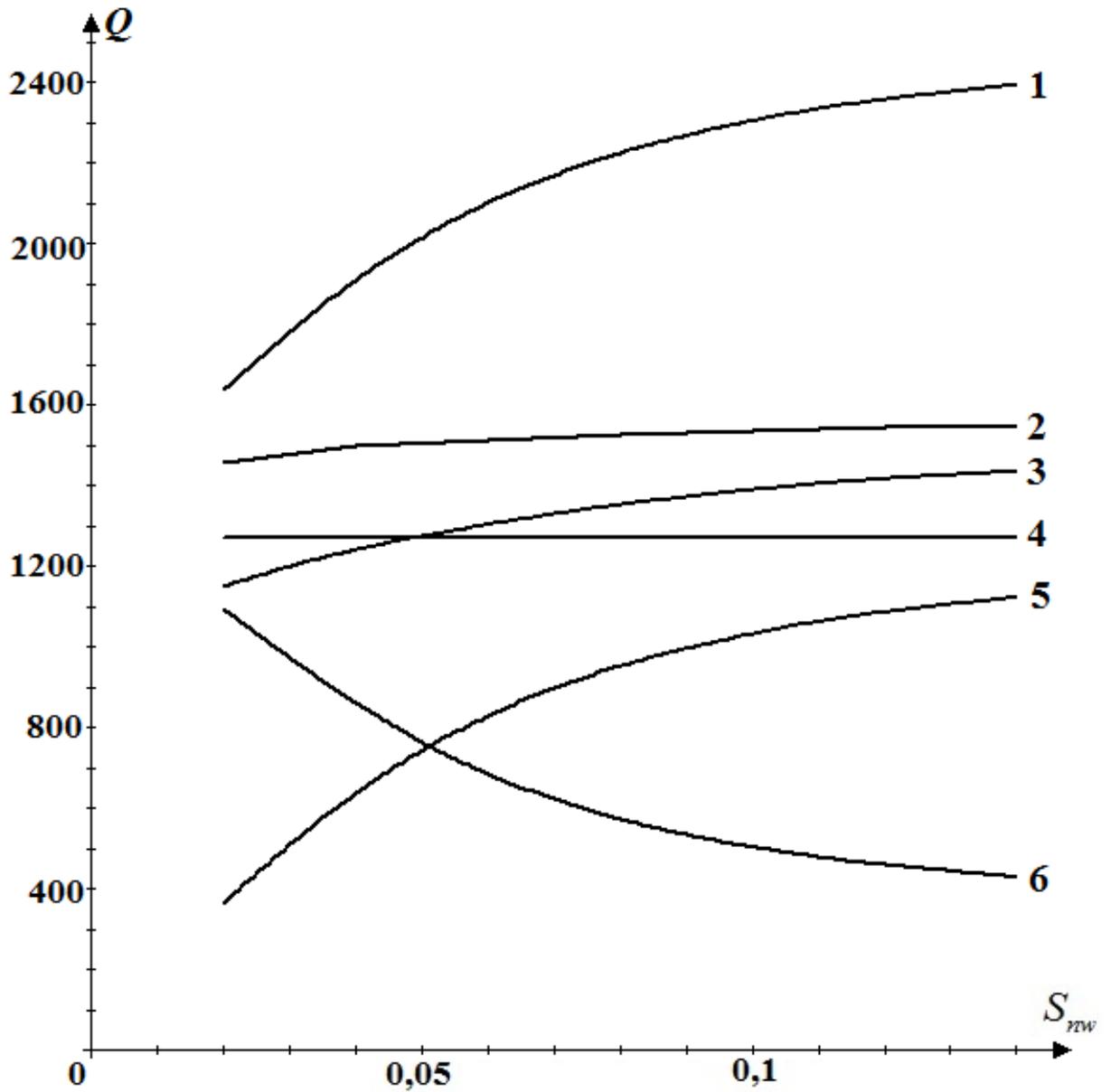


Рисунок 4.5 – Изменение абсолютных величин расходов Q , $\text{м}^3/\text{ч}$, воздушного потока в зависимости от площадей неплотностей верхнего укрытия $S_{гzw}$, м^2 :

- 1 – аспирируемого из нижнего укрытия Q_a ; 2 – максимального расхода эжектируемого по телескопическому желобу Q_m ; 3 – эжектируемого в желобе при герметизации его стенок Q_2 ;
 4 – поступающего через неплотности нижнего аспирационного укрытия Q_n ;
 5 – транзитного расхода Q_1 ; 6 – рециркулируемом в желобе Q_r / Q_1

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. Разработана методика инженерного расчета объемов аспирируемого воздуха при перегрузках сухих ненагретых материалов с естественной циркуляцией, осуществляемая посредством комбинированного использования цилиндрической байпасной камеры и перфорированного желоба. Выполненные экспериментальные и численные исследования показали, что предлагаемая методика имеет достаточную точность.

2. Предложены рекомендации по проектированию разработанного аспирационного укрытия для более эффективной его работы с меньшими затратами на эксплуатацию. Экономический эффект состоит в снижении энергоёмкости и затрат на очистку пылевых выбросов.

3. Предложены значения коэффициентов рециркуляции для расчета аспирационной системы при использовании байпасной камеры и при комбинированном использовании байпасной камеры и перфорации желоба.

4. Разработана методика расчета расхода эжектируемого воздуха в телескопических погрузчиках.

5. Высокая энергоёмкость телескопических аспирационно-технологических установок (АТУ) перегрузочных станций обусловлена эжекционной способностью гравитационных потоков сыпучего материала, нагнетающих в аспирационные укрытия большое количество воздуха, что существенно увеличивает требуемую производительность систем аспирации. Мощность АТУ можно существенно уменьшить применением коаксиально расположенных загрузочных телескопических желобов и гофрированных непроницаемых стенок, расположенных вокруг желоба, а также герметизацией верхних и нижних укрытий, примыкающих к желобам.

Коаксиально расположенные желоба и байпасные камеры способствуют формированию внутренней рециркуляции эжектируемого воздуха и заметному снижению мощности транзитного воздуха, поступающему из желоба в аспирируемое укрытие.

6. Аналитическая оценка расходов воздуха перемещающегося внутри полости желоб - байпасная камера может быть осуществлена путем линеаризации уравнений динамики и межкомпонентного взаимодействия с последующим решением трансцендентных уравнений в универсальной математической среде Maple.

7. Численные исследования показали, что основным параметром снижения транзитного расхода эжектируемого воздуха и увеличения объемов рециркулируемого воздуха является степень герметизации верхнего укрытия. Например, при снижении суммарной площади неплотностей этого укрытия от $0,14 \text{ м}^2$ до $0,02 \text{ м}^2$ расход транзитного воздуха уменьшится в три раза, а рециркулируемого увеличится в 2,5 раза. Общая производительность местного отсоса от нижнего укрытия при этом сократилась в 1,68 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача по выявлению закономерностей рециркуляционных течений, организованных в системе «загрузочный канал – байпасная камера», способствующих снижению объема увлекаемого сыпучим материалом воздуха и, как следствие, снижению производительности системы обеспыливающей вентиляции

Основные выводы по работе

По итогам диссертационного исследования получены следующие результаты.

1. На основе дифференциальных уравнений эжектируемого воздуха в вертикальной перфорированной трубе, при перемещении в ней потока сыпучего материала, и рециркулируемого воздушного потока в байпасной камере, разработана математическая модель комбинированной рециркуляции воздуха через отверстия стенок трубы и торцевые каналы на концах байпасной камеры. Путём решения дифференциальных уравнений выявлены закономерности снижения объёмов эжекции за счет рециркуляции воздуха.

2. Теоретически доказано, что организация рециркуляции воздушных потоков при комбинированном байпасировании снижает расход воздуха, увлекаемого потоком сыпучего материала в нижнее укрытие (приёмную ёмкость), а значит, снижается расход отсасываемого воздуха, что приводит к снижению энергозатрат на эксплуатацию систем вентиляции.

Выявлены закономерности изменения: расходов эжектируемого и рециркулируемого воздушных потоков в зависимости от способа организации рециркуляции и параметра эжекции; скорости воздуха по длине загрузочной трубы; статических давлений в верхнем и нижнем укрытиях, на концах загрузочной трубы от параметра эжекции. Показано, что при небольших параметрах эжекции ($Ke = 0,6$), только при торцевом перетекании воздуха, расход

нагнетаемого в укрытие воздуха снижается в 1,35 раза относительно случая перегрузки материала в трубе с непроницаемыми стенками, а при комбинированном байпасировании - в 1,78 раза. При увеличении параметра эжекции до трёх наблюдается большее снижение расхода эжектируемого воздуха. При торцевом перетекании воздуха этот расход уменьшается в 1,72 раза, а при комбинированном байпасировании - в 4,29 раза.

3. Путём натурального эксперимента по исследованию рециркуляции воздуха, в соосно расположенных круглой загрузочной трубе и круглой байпасной камере, выявлено, что при снабжении загрузочного канала аспирационного укрытия байпасной камерой, где перетекание воздуха осуществляется на их торцах, возникает рециркуляция воздуха. Экспериментально доказано, что явление рециркуляции воздуха способствует снижению расхода воздуха, вытесняемого из укрытия, а значит и объёма эжектируемого воздуха. Наиболее рациональным представляется соотношение диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы равное 2-2,5.

В результате численного и натурального экспериментов показано, что скорость рециркулируемого воздуха снижается при увеличении радиуса байпасной камеры. Величины скорости, найденные экспериментально и численно, удовлетворительно согласуются.

Определено, что нанесение отверстий на загрузочную трубу при комбинированном использовании байпасной камеры и перфорации приводит к снижению расхода эжектируемого воздуха только в случае, когда перфорация находится в области разрежения. При нанесении перфорации в области избыточного давления, воздух, выходящий из отверстий в полость байпасной камеры, создаёт сопротивление восходящему потоку, что препятствует движению рециркулируемого воздуха.

Использование одной лишь байпасной камеры может снизить количество удаляемого воздуха до 69%, а при комбинированном использовании камеры и перфорации - до 84%, что согласуется с теоретическими расчётами.

4. Разработана инженерная методика расчёта объёмов аспирируемого воздуха при перегрузках сухих ненагретых материалов с естественной циркуляцией, осуществляемой посредством комбинированного использования цилиндрической байпасной камеры и перфорированной загрузочной трубы.

Разработаны рекомендации по проектированию местных отсосов закрытого типа сниженной энергоёмкости.

Разработана методика расчёта расхода эжектируемого воздуха в телескопических погрузчиках.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят: в разработке и совершенствовании систем промышленной вентиляции, за счет использования как рециркуляционных, так и закрученных воздушных течений, а также за счет развития методов их расчёта, при помощи современных методов вычислительной аэромеханики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейков, О. Д. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков / О. Д. Нейков, И. Н. Логачев. – М.: Металлургия, 1981. – 192 с.
2. Минко, В. А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов / В. А. Минко. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1981. – 176 с.
3. Минко, В. А. Обеспыливание в литейных цехах машиностроительных предприятий / В. А. Минко, М. И. Кулешов, Л. В. Плотникова. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
4. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха / А. И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1974. – 207 с.
5. Голышев, А. М. Исследование местной вытяжной вентиляции при обжиге и грохочении железорудных окатышей : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Александр Маркович Голышев. – Кривой Рог, 1980. – 242 с.
6. Исследование и разработка средств оптимизации аспирационных укрытий узлов перегрузки сыпучих материалов : отчет о НИР (заключ.) / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т безопасности труда в горнорудной пром-сти) (ВНИИБТГ) ; рук. Логачев И. Н., Голышев А. М. – Кривой Рог, 1982. – 90 с. – № ГР 8101069. – Инв. № 02830003679.
7. Логачев, И. Н. Снижение потерь пылевидного материала при аспирации в условиях фабрик окомкования железных руд / И. Н. Логачев, А. М. Голышев, Л. М. Черненко // Горный журнал. – 1985. – № 3. – С. 57–59.
8. Кузьмин, А. В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. Справочник / А. В. Кузьмин. – Минск: Высшая школа, 1983. – 350 с.
9. Банит, Ф. Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов / Ф. Г. Банит, А. Д. Малыгин. – М.: Стройиздат, 1979. – 351 с.

10. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Стандаринформ, 2007. – 4 с.
11. Бабанов, С. А. Пневмокониозы от воздействия производственной пыли различной степени фиброгенности / С. А. Бабанов, П. В. Гайлис // Трудный пациент. Т. 8. – 2010. – №5. – С. 35-38.
12. Минко, В. А. Комплексное обеспыливание производственных помещений при транспортировании и механической переработке сыпучего минерального сырья : дис. ... д-ра. техн. наук: 05.26.02 / Минко Всеволод Афанасьевич. – Москва, 1987. – 513 с.
13. ГОСТ 17.2.3.03-2014 Правила установки допустимых выбросов загрязняющих веществ промышленными предприятиями. – М.: Стандартинформ, 2014. – 26 с.
14. Калмыков, А. В. Борьба с пылью и шумом на обогатительных фабриках / А. В. Калмыков, Д. Ф. Журбинский. – М.: Недра, 1984. – 222 с.
15. ОСТ 14–17–98–83 ССБТ. Подготовка металлургического сырья. Аспирация. Метод расчета производительности местных отсосов укрытий мест перегрузок сыпучих материалов : введ. 01.03.84 (дата начала действия, в ГОСТе ничего не написано по этому поводу). – М.: Минчермет СССР, 1983. – 32 с.
16. Инструкция по комплексному улучшению условий труда на обогатительных фабриках металлургической промышленности. – Ленинград: Ин-т Механообр., 1984. – 169 с.
17. Логачев, И. Н. Аэродинамические основы аспирации / И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – Спб: Химиздат, 2005. – 659 с.
18. Альбом аспирационных укрытий, предназначенных для локализации пылевыведений средствами обеспыливающей вентиляции. – Белгород, 1992 г.
19. Логачев, И. Н. Основы проектирования и конструирования систем обеспыливающей вентиляции : учебное пособие / И. Н. Логачев, Т. А. Должикова. – 2-е изд., стер. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 83 с.

20. Исследование и разработка централизованных систем аспирации и очистки воздуха для фабрик ГОКов. Ч.1. Аспирационные системы / Отчет ВНИИБТГ. – Кривой Рог, 1978. – 256 с
21. Логачев, К. И. Аэродинамика всасывающих факелов / К. И. Логачев. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2000. – 175 с.
22. Отопление и вентиляция. Часть 2. Вентиляция / Под ред. В.Н. Богословского. – Москва : Стройиздат, 1976. – 439 с.
23. Гримитлин, М. И. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных заводов / М. И. Гримитлин. – М.: Машиностроение, 1978. – 192 с.
24. Логачев, И. Н. Энергосбережение в аспирации: монография / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова. – М.: РХД, 2013. - 504 с.
25. А. с. 921994 СССР. МКИ В65 G21/00. Аспирационное укрытие места загрузки ленточного конвейера / С. А. Козинец, В. Д. Олифер, Г. Ю. Хвостов. – № 2972381/27–03 ; заявл. 15.08.80.
26. А. с. 962130 СССР. МКИ В65 G21/20. Устройство для уплотнения борта аспирационного укрытия ленточного конвейера / Н. И. Кузьминок [и др.].-№ 3271544/27–03 ; заявл. 18.03.81.
27. А. с. 882854 СССР. МКИ В65 G21/00. Укрытие места загрузки ленточного конвейера / И. Ф. Юфит. - № 2897490/27–03 ; заявл. 19.03.80.
28. А. с. 589431 СССР. МКИ E21 F5/00. Аспирационное укрытие места перегрузки ленточного конвейера / К. В. Кузьминов, А. П. Микулевич, Ю. В. Вдовин. - № 2187663/22–03 ; заявл. 29.10.75.
29. А. с. 1148814 СССР. МКИ В65 G21/08. Укрытие места перегрузки ленточного конвейера / С. И. Сергеев [и др.] – № 3670778/27–03 ; заявл. 12.12.83.
30. А. с. 947015 СССР. МКИ В65 G21/00. Укрытие места загрузки ленточного конвейера / Н. Ф. Гращенко [и др.]. – № 2874795/27–03 ; заявл. 24.01.80.
31. Логачев, И. Н. Аспирация перегрузок сыпучих материалов агломерационных фабрик / И. Н. Логачев // Сб. научных трудов "Местная вытяжная вентиляция". – 1969. – С. 93-100.
32. Нейков, О. Д. Исследование аспирации мест перегрузок материалов на

лабораторной установке / О. Д. Нейков, Е. Н. Бошняков // Сб. научных трудов Криворожского филиала ИГД АН УССР. – 1962. – Вып. 1. – С. 145-154.

33. Недин, В. В. Борьба с пылью на рудниках / В. В. Недин, О. Д. Нейков. – М.: Недра, 1965. – 200 с.

34. Нейков, О. Д. Аспирация паропылевых смесей при обеспыливании технологического оборудования / О. Д. Нейков, И. Н. Логачев, Р. Н. Шумилов. – Киев: Наукова думка, 1974. – 127 с.

35. Минко, В. А. Обеспыливание в литейных цехах машиностроительных предприятий / В. А. Минко. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

36. Минко, В. А. Некоторые вопросы аэродинамики гравитационного потока мелкодисперсного сыпучего материала / В. А. Минко // ИФЖ. Т. XVI. – 1969. – №6. – С. 1045 - 1051.

37. Минко, В. А. Комплексное обеспыливание производственных помещений при транспортировании и механической переработке сыпучего минерального сырья : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 05.26.02 / Минко Всеволод Афанасьевич. – М., 1987. – 33 с.

38. Логачев, И. Н. Способы и средства снижения энергоемкости аспирационных систем при перегрузке сыпучих материалов / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. – 2013. – № 6. – С. 66-70.

39. А. с. 931601 СССР, МКИ В65 G 11/00. Герметизирующая точка пневмокласификатора / Г. К. Сульдмиров, З. И. Хоменко, А. С. Ливенцев, Л. К. Ковтун – № 2765531/27–11; заявл. 03.05.79.

40. А. с. 662462 СССР, МКИ В65 G 65/32. Устройство для загрузки сыпучих материалов / И. П. Поляков, А. В. Снагорский. – № 2441103/22–11; заявл. 04.01.77.

41. А. с. 745817 СССР, МКИ В65 G 47/78. Устройство для перегрузки материала с конвейера / Г. А. Цимбал, Е. Д. Горбатко. – № 2072953 ; заявл. 04.11.74.

42. А. с. 1460333 СССР, МКИ В65 G 21/00, E21F5/00. Способ подачи сыпучего материала в аспирационное укрытие / В. А. Минко, М. И. Кулешов, Н. Г. Абрамкин, О. Ф. Лапин, В. П. Наумов. – № 4068642/22-03; заявл. 20.05.86.

43. Пат. 136857 РФ, МПК E21F5/00. Аспирационное укрытие места выгрузки сыпучего материала / К. И. Логачев, И. В. Крюков, Ю. Г. Овсянников, И. Н. Логачев. – № 2013135082/03; заявл. 25.07.2013.

44. А. с. 615001 СССР, МКИ В65 G 11/02. Устройство для транспортирования самотеком сыпучих материалов / Н. Ф. Гращенков, Б. Цай. – № 2398123/29–11; заявл. 02.09.76.

45. А. с. 644679 СССР. МКИ В65 G 11/02. Устройство для транспортирования сыпучих материалов самотеком / Е. А. Дмитрук, В. П. Сухенко, В. П. Чоботов. – № 2473005/29-11 ; заявл. 13.04.77.

46. А. с. 1030563 СССР. МКИ E21 F 5/00. Укрытие места перегрузки сыпучего материала / В. Д. Олифер, С. А. Козинец. – № 3381533/22-03; заявл. 25.11.81

47. А. с. 998269 СССР. МКИ В65 G 69/18. Устройство для аспирации при перегрузке сыпучих материалов / Н. Ф. Гращенков [и др.] - № 3300808/27–11; заявл. 20.03.81.

48. А. с. 445599 СССР. МКИ В65 G 3/18. Укрытие места пересыпки сыпучего материала / Н. С. Цицорин. – № 1703602/23-26 ; заявл. 06.10.71.

49. А. с. 1105406 СССР. МКИ В65 G 21/00. Укрытие места загрузки ленточного конвейера / И. Н. Логачев [и др.]. – № 3589109/27-03 ; заявл. 10.05.83.

50. А. с. 485928 СССР. МКИ В65 G19/28. Гравитационный желоб для сыпучих материалов / О. Д. Нейков [и др.]. – №1688112/27-11; заявл. 09.08.71.

51. А. с. 777238 СССР. МКИ E21 F5/00. Укрытие места перегрузки сыпучих материалов на ленточных конвейерах / М. И. Феськов, Н. Н. Дмитриенко. – № 2728240/22-03; заявл. 12.02.79.

52. А. с. 939347 СССР. МКИ В65 G 21/08. Устройство обеспыливания пунктов перегрузки материала на ленточных конвейерах / С. И. Сергеев [и др.]. – № 3232898/27-03; заявл. 31.12.80.

53. А. с. 962127 СССР. МКИ В65 G 21/00. Аспирационное укрытие узла перегрузки ленточных конвейеров / В. И. Бережной [и др.]. – № 3265798/27-03; заявл. 24.03.81.

54. А. с. 1190064 СССР. МКИ E21 F5/00. Устройство для борьбы с пылью / Р. С. Шарафутдинов, А. Н. Быков, Г. Р. Антонянц. – № 3471887/22-03 ; заявл. 19.07.82.

55. А. с. 950925 СССР. МКИ E21 F5/00. Укрытие мест перегрузки сыпучих материалов / В. Д. Олифер, В. Б. Рабинович, С. А. Козинец. – № 3233960/22–03; заявл. 09.01.81.

56. А. с. 921994 СССР. МКИ В65 G21/00. Аспирационное укрытие места загрузки ленточного конвейера / С. А. Козинец, В. Д. Олифер, Г. Ю. Хвостов. – № 2972381/27-03; заявл. 15.08.80.

57. Нейков, О. Д. Аспирация при производстве порошковых материалов / О. Д. Нейков, И. Н. Логачев. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.

58. А. с. 962130 СССР. МКИ В65 G21/20. Устройство для уплотнения борта аспирационного укрытия ленточного конвейера / Н. И. Кузьминок [и др.]. – № 3271544/27-03 ; заявл. 18.03.81.

59. А. с. 882854 СССР. МКИ В65 G21/00. Укрытие места загрузки ленточного конвейера / И. Ф. Юфит. – № 2897490/27-03; заявл. 19.03.80.

60. А. с. 589431 СССР. МКИ E21 F5/00. Аспирационное укрытие места перегрузки ленточного конвейера / К. В. Кузьминов, А. П. Микулевич, Ю. В. Вдовин. – № 2187663/22–03; заявл. 29.10.75.

61. А. с. 1148814 СССР. МКИ В65 G21/08. Укрытие места перегрузки ленточного конвейера / С. И. Сергеев [и др.]. – № 3670778/27-03 ; заявл. 12.12.83.

62. А. с. 947015 СССР. МКИ В65 G21/00. Укрытие места загрузки ленточного конвейера / Н. Ф. Гращенко [и др.]. – № 2874795/27-03; заявл. 24.01.80.

63. Феськов, М. И. Использование факелов диспергированной воды для пылеотсоса / М. И. Феськов // Безопасность труда в промышленности. – 1982. – № 9. – С. 44-46.

64. Исследование пыле- и аэродинамики аспирационных сетей фабрик ГОКов: отчет о НИР (заключ.) / ВНИИ безопасности тр. в горноруд. пром-сти (ВНИИБТГ) ; рук.: И. Н. Логачев, А. М. Голышев. – Кривой Рог, 1985. – Ч. 1. – 82 с. – № ГР 01530008202. – Инв. № 02850048954.

65. Логачев, И. Н. Снижение потерь пылевидного материала при аспирации в условиях фабрик окомкования железных руд / И. Н. Логачев, А. М. Голышев, Л. М. Черненко // Горный журнал. – 1985. – №3. – С. 57-59.

66. А.с. № 1257230 СССР. МКИ E21 F 5/00, B65 G 69/18. Аспирационное укрытие места перегрузки сыпучего материала / В. А. Минко [и др.]. – № 386625/22-03; заявл. 15.03.85.

67. А. с. № 1416712 СССР. МКИ МКИЕ21 F 5/00, B65 G 69/18. Аспирационное укрытие места перегрузки сыпучего материала / В. А. Минко [и др.]. – № 4130248/22-03; заявл. 27.06.86.

68. А. с. № 1661450 СССР. МКИ E21 F 5/00. Аспирационное укрытие места выгрузки сыпучего материала / В. П. Наумов [и др.]. – № 471579/03; заявл. 06.07.89.

69. А. с. № 1812320 СССР. МКИ E21 F 5/20. Аспирационное укрытие места перегрузки сыпучего материала / В. Н. Баженов [и др.]. – № 4863749/03; заявл. 04.09.90.

70. А.с. № 619673 СССР. МКИ E21 F 5/00. Аспирационное укрытие пункта перегрузки сыпучих материалов / В. М. Маринченко, В. Л. Петухов, Л. К. Саплинов, И. И. Афанасьев. – № 2453659/22-03; заявл. 15.02.77.

71. А. с. № 589170 СССР. МКИ B65 G 21/20. Уплотняющее устройство для бортов аспирационного укрытия / И. Н. Логачев, А. М. Голышев. – № 2385473-/29-03; заявл. 15.07.76.

72. А. с. № 1745653 СССР. МКИ B65 G 69/18, E21 F 5/00. Аспирационное укрытие места перегрузки сыпучего материала / В. Н. Баженов, Н. Г. Абрамкин, О. Ф. Лапин, Ю. Г. Овсянников. – № 4792441/11; заявл. 15.02.90.

73. А. с. № 1451281 СССР. МКИ E21 F 5/00. Аспирационное укрытие места выгрузки сыпучего материала / Н. Г. Абрамкин [и др.]. – № 4152702/22-03; заявл. 22.11.86.

74. Пат. № 97438 РФ. МПК E21 F 5/00, B65 G 69/18. Аспирационное укрытие места перегрузки сыпучего материала / В. М. Киреев [и др.]. – № 2010114489/03; заявл. 12.04.2010.

75. А. с. № 350971 СССР. МКИ E21 F 5/00. Аспирационное укрытие / А. П. Колесник, И. Н. Логачев, Г. Н. Николина. – № 1459711/22-3; заявл. 13.07.70.

76. Логачев, И. Н. Особенности динамического взаимодействия измельченного материала с воздухом в наклонных желобах / И. Н. Логачев, А. М. Голышев // Обеспыливание технологических процессов в промышленности строительных материалов. – М.: МИСИ; БТИСМ, 1984. – С. 10-19.

77. Местные отсосы и укрытия технологического оборудования рудоподготовительных фабрик. – Кривой Рог : Всесоюз. науч.-исслед. ин-т безопасности труда в горнорудной промышленности (ВНИИБТГ), 1985. – 87 с.

78. Внедрение комплекса средств снижения уноса материала в аспирационную сеть: отчет о НИР/Логачев И. Н. – Кривой Рог : Всесоюз. науч.-исслед. ин-т безопасности труда в горнорудной промышленности (ВНИИБТГ), 1982, – 51 с.

79. Исследование аэродинамики и разработка конструкций местных отсосов перегрузок сыпучих материалов: отчет о НИР/ Логачев И. Н., Минков В. А., Колесник А. П. – Кривой Рог : НИИрудвентиляция, 1970. – 131 с.

80. Поиск новых средств локализации пылевыведений при перегрузках сыпучих материалов на фабриках ГОКов: отчет о НИР/Логачев И. Н. – Кривой Рог : Всесоюз. науч.-исслед. ин-т безопасности труда в горнорудной промышленности (ВНИИБТГ), 1986, – 87 с.

81. Красовицкий, Ю. В. Обеспыливание промышленных газов в фаянсовом производстве / Ю. В. Красовицкий, А. В. Малинов, В. В. Дуров. – М.: Химия, 1994. - 272 с.

82. Коузов, П. А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности / П. А. Коузов, А. Д. Малыгин, Г. М. Скрябин. – Спб.: Химия, 1982. – 256 с.
83. Ужов, В. Н. Подготовка промышленных газов к очистке / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – М.: Химия, 1975. – 216 с.
84. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха / А. И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
85. Алешин, В. М. Пылеулавливание в металлургии / В. М. Алешин, А. Ю. Вальдберг, Г. М. Гордон [и др.]. – М.: Металлургия, 1984. – 336.
86. Минко, В. А. Основы промышленной вентиляции и пневмотранспорта / В. А. Минко. – М., 1975. – 140 с.
87. Временные указания по расчету объемов аспирируемого воздуха от укрытий мест перегрузки при транспортировании пылящих материалов. – М., – 1973.
88. Сапожников, М. Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: учебник для строительных вузов и факультетов / М. Я. Сапожников. – М.: Высш. школа, 1971. – 382 с.
89. Афанасьев, И. И. Обеспыливание на дробильных и обогатительных фабриках. Справочное пособие / И. И. Афанасьев, Ф. И. Данченко, Ю. И. Пирогов. – М.: Недра, 1989. – 197 с.
90. Афанасьев, И. И. Обеспыливание воздуха на фабриках горнообогатительных комбинатов / И. И. Афанасьев, И. Н. Логачев. – М.: Недра, 1972. – 184 с.
91. Афанасьев, И. И. Теоретические основы расчета местных отсосов пылящего оборудования. Вентиляция и очистка воздуха / И. И. Афанасьев, И. Н. Логачев – М.: Недра, 1972. – Вып. 7. – С. 196-206.
92. Афанасьев, И. И., Логачев И. Н. Теоретические основы расчета аспирации технологического оборудования. Борьба с силикозом. Т. IX. – М.: Наука, 1974. – С. 136-139.
93. Калмыков, А. В. Обеспыливание дробильных цехов / А. В. Калмыков. –

М.: Недра, 1976. – 207 с.

94. Овсянников, Ю. Г. Рециркуляционные системы аспирации оборудования механической переработки сыпучих материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Овсянников Юрий Григорьевич. – Белгород, 2000. – 199 с.

95. Бутаков, С. Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции / С. Е. Бутаков. – М.: Проффиздат, 1949. – 268 с.

96. Зильберберг, Я. И. Исследование аспирации при обеспыливании перегрузочных узлов непрерывного транспорта : автореф. дис. ... канд. техн. наук : Караганда, 1980. – 22 с.

97. Бошняков, Е. Н. Исследование аспирируемых укрытий мест загрузки руды на конвейеры / Е. Н. Бошняков, А. Н. Сербин // Вентиляция и очистка воздуха. – М.: Недра, 1968. – Вып. 2. – С. 122-135.

98. Недин, В. В. Борьба с пылью на рудниках / В. В. Недин, О. Д. Нейков – М.: Недра, 1965. – 200 с.

99. Килин, П. И. Обеспыливание мест загрузки конвейеров на горнорудных предприятиях: автореф. ... дис. канд. техн. наук : / Килин П. И. – Свердловск, 1977.

100. Любимов, А. И. Исследование параметров аспирационного обеспыливания перегрузочных узлов транспортирования и переработки угля на обогатительных фабриках: автореф. дис. ... канд. техн. наук : / Любимов А. И. – Кемерово, 1977.

101. Олифер, В. Д. Исследование аспирации перегрузок сыпучих материалов по вертикальным желобам: автореф. дис. ... канд. техн. наук : / Олифер В. Д. – Свердловск, 1974.

102. Временные указания по расчету объемов аспирируемого воздуха от укрытий мест перегрузок при транспортировании пылящих материалов. АЗ-611. – М.: Изд-во ГПИ Сантехпроект (ГПИ Сантехпроект, НИИрудвентиляция, ИПМ АН УССР). 1973, – 31 с.

103. А. с. № 1733637 СССР. МКИ Е 21 F 5/00, В 65 G 21/00. Аспирационное укрытие / С. А. Трищенко, И. А. Подгорнов, О. Ф. Лапин, В. А. Минко. - № 4794597/03; заявл. 21.02.90.

104. А. с. №1721264 СССР. МКИ Е 21 F 5/20. Укрытие места перегрузки сыпучего материала с конвейера на конвейер / В. Н. Баженов, Н. Г. Абрамкин, О. Ф. Лапин, В. А. Минко. - № 4740106/03; заявл. 19.09.89.

105. Голышев А. М. Исследование местной вытяжной вентиляции при обжиге и грохочении железнорудных окатышей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : – Кривой Рог, 1980. – 21 с.

106. А.с. № 1661450 СССР. МКИ Е 21 F 5/00. Аспирационное укрытие места выгрузки сыпучего материала / В. П. Наумов [и др.]. - № 4715790/03; заявл. 06.07.89.

107. Слюсаренко, Г. В. Аспирационная система с принудительной рециркуляцией аспирируемого воздуха / Г. В. Слюсаренко, В. И. Бережной, А. М. Кириченко // Тез.докл. Всесоюзной конф. "Ускорение научно-технического прогресса в промышленности строительных материалов и строительной индустрии". Ч. 3. – Белгород: БТИСМ, 1987. – С. 162.

108. Логачев, И. Н. Методы снижения энергоемкости систем аспирации. Часть 3. Расчет погрузочного устройства и предложения по его совершенствованию / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. – 2014. – №6. – С. 57-61.

109. Пат. № 146813 РФ. МПК Е 21 F 5/00. Аспирационное укрытие места перегрузки сыпучего материала / К. И. Логачев, И. В. Крюков, О. А. Аверкова, И. Н. Логачев. - 201415752/03; заявл. 18.04.2014.

110. Логачев, И. Н. Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщение 1. Уравнения динамики эжектируемого и рециркулируемого воздуха / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 10. – С. 46-53.

111. Логачев, И. Н. Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщение 2. Линеаризация дифференциальных уравнений / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 11-12. – С. 62-70.

112. Логачев, И. Н. Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщение 3. Численный эксперимент и результаты исследований / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 1. – С. 79-87.

113. Nemeon W. C. L. Plant and Process Ventilation. N. Y.: The Industrial Press, 1955, 352 p.

114. Серенко А. С. Обеспыливание воздуха в огнеупорной промышленности / А. С. Серенко. – М.: Metallurgizdat, 1953. 144 с.

115. Шелектин, А. В. Определение объемов воздуха для аспирации оборудования дробильно-сортировочных фабрик // Борьба с силикозом. М.: Изд-во АН СССР. 1959. Т. II. С. 135-140.

116. Logachev, I.N. and K.I. Logachev, 2014. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions. Boca Raton: CRC Press, pp: 417.

117. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions. 2015. Boca Raton: CRC Press, pp: 576.

118. Обеспыливающая вентиляция / В. А. Минко, И. Н. Логачев, К. И. Логачев ; под общ. ред. В. А. Минко. - Москва : Теплотехник. [Т. 1]. - 2009. - 458 с.

119. Обеспыливающая вентиляция / В. А. Минко, И. Н. Логачев, К. И. Логачев ; под общ. ред. В. А. Минко. - Белгород : БГТУ. Т. 2. - 2010. - 564 с.

120. Аверкова, О.А. Имитационное моделирование эжекции воздуха в круглой трубе с байпасной камерой / О. А. Аверкова, И. В. Крюков, Е. И. Толмачева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – №2. – С. 207-211.

121. Логачев, К. И. Моделирование воздушных потоков в аспирационном укрытии с рециркуляцией / К. И. Логачев, И. В. Крюков, О. А. Аверкова / Новые огнеупоры. – 2015. – №8. – С. 57-62.

122. Крюков, И. В. Исследование процессов минимизации объемов удаляемого воздуха при комбинированном использовании перфорированного желоба с цилиндрической байпасной камерой / И. В. Крюков, И. Н. Логачев, В. А. Уваров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №8. – С. 108-112.

123. Крюков, И. В. Исследование процессов рециркуляции воздуха в перфорированном желобе с байпасной камерой, находящимся под избыточным давлением / И. В. Крюков, И. Н. Логачев, В. А. Уваров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №7. – С. 85-89.

124. Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems. Part 1. Derivation of Hydrodynamic Equations of Air Ejection by a stream of Free-Flowing Material in a Perforated Trough with Bypass Chamber / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova, I.V. Kryukov// Refractories and Industrial Ceramics. - 2014. - №1.pp 70-75.

125. Simulation of air flows in ventilation shelters with recirculation / K.I. Logachev, O.A. Averkova, I.V. Kryukov // Refractories and Industrial Ceramics. - 2015. - №4. pp 428-434.

126. Логачев, И. Н. Особенности рециркуляции воздуха в перегрузочном желобе с комбинированной байпасной камерой. Сообщение 1. Основные уравнения / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова, И. В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 4. – С. 62-71.

127. Логачев, И. Н. Особенности рециркуляции воздуха в перегрузочном желобе с комбинированной байпасной камерой. Сообщение 2. Решение уравнений и результаты расчета / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова, И. В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 5. – С. 54-62.

128. Аверкова, О. А. Разработка и теоретическое обоснование методов расчета и конструирования систем местной обеспыливающей вентиляции: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Аверкова Ольга Александровна. – Волгоград, 2015. – 320 с.

129. Логачев, И. Н. Расчет аспирации перегрузочного узла [Электронный ресурс]: методические указания для курсового проектирования / И. Н. Логачев, Е. Н. Попов. – Белгород: Издательство БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012.

130. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

131. ГОСТ 24026–80 Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. – М. : Издательство стандартов, 1981. – 18 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Программа расчета объёмов аспирации при байпасировании загрузочной телескопической трубы

```

> restart; Digits := 6 :
  "Программа расчета объемов аспирации ТЗС – JETPACK с обычным
  байпасированием телескопического желоба" :
> "ЧАСТЬ 1. Объемы эжектируемого воздуха" :
> "БЛОК 1. Исходные данные" :

> "Массовый расход перегружаемого материала, кг/с" : Gm := 20 ;
  "Высота желоба, м" : H1 := 4 : "Диаметры секция желоба, м" : d1 := 0.36; d2
  := 0.3; "Условный диаметр желоба, м" : D1 :=  $\left( \frac{d1 + d2}{2} \right)$ ;
  "Диаметр наружного рукава желоба, м" : Dn := 0.45;
  "Средний зазор между смежными секциями желоба, м" : zc :=  $\frac{d1 - d2}{2}$  ;
  "Количество секций телескопического желоба, шт" : Ng := 10;
  "Условная площадь живого сечения одного зазора, м2" : fz0 := evalf(π) · D1
  · zc; "Суммарная площадь всех зазоров, м2" : Sz := Ng · fz0;
  "Площадь поперечного сечения желоба, м2" : Sg :=  $\frac{evalf(\pi) \cdot D1^2}{4}$ ; Su := Sg;
  "Площадь байпасной камеры, м2" : Sω :=  $evalf(\pi) \cdot \frac{Dn^2 - D1^2}{4}$ ; r :=  $\frac{S\omega}{Su}$ ;
  "Относительная степень перфорации стенок желоба, б/р" : es :=  $\frac{Sz}{Sg}$ ;
  "К.м.с. отверстия перфорации" : ζD := 1.5;
  "К.м.с. отверстий неплотностей наружной стенки аспирационного укрытия" :
  ζm := 2.4;
  "Степень перетекания воздуха через перфорационные отверстия желоба, б/р" :
  E :=  $\frac{es}{\sqrt{\zeta D}}$ ; "Площадь неплотностей верхнего укрытия, м2" : Snw := 0.02;
  "Площадь неплотностей нижнего укрытия (приемной камеры), м2" : Snk
  := 0.15;
  "Коэффициенты местных сопротивлений: входу воздуха через неплотности
  верхнего укрытия" : ζnw :=  $2.4 \cdot \left( \frac{Sg}{Snw} \right)^2$ ;
  "выходу воздуха через неплотности нижнего укрытия" : ζnk :=  $2.4 \cdot \left( \frac{Sg}{Snk} \right)^2$ ;
  "Разрежение в аспирируемой камере нижнего укрытия, Па" : Py := 8;
  "Площадь неплотностей наружной стенки аспирируемой камеры, м2" : Fa
  := 0.15; "Коеффициент лобового сопротивления частицы, б/р" : ψ0 := 1.1;
  "Плотность частиц, кг/м3" : ρm := 1800; "Плотность воздуха в желобе, кг/м3" :
  ρg := 1.2; "Плотность наружного воздуха, кг/м3" : ρw := 1.2;
  "Эквивалентный диаметр частиц, мм" : de := 5;

```

"Начальная высота падения частиц, м" : $H0 := 0.5$;

"Скорость частиц при входе в желоб, м/с" : $g := 9.81$; $vn := \sqrt{2 \cdot g \cdot H0}$;

"То же при выходе из желоба, м/с" : $vk := \sqrt{2 \cdot g \cdot (H1 + H0)}$;

"Отношение скоростей падения частиц, б/п" : $n := \frac{vn}{vk}$;

"Безразмерное разрежение в аспирируемой камере нижнего укрытия" : py

$$:= \frac{2 \cdot Py}{\rho g \cdot vk^2};$$

$$Gm := 20$$

$$dl := 0.36$$

$$d2 := 0.3$$

$$Dl := 0.330000$$

$$Dn := 0.45$$

$$zc := 0.030000$$

$$Ng := 10$$

$$fz0 := 0.0311016$$

$$Sz := 0.311016$$

$$Sg := 0.0855298$$

$$Su := 0.0855298$$

$$S\omega := 0.0735132$$

$$r := 0.859504$$

$$es := 3.63635$$

$$\zeta l := 1.5$$

$$\zeta m := 2.4$$

$$E := 2.96908$$

$$S_{nw} := 0.02$$

$$S_{nk} := 0.15$$

$$\zeta_{nw} := 43.8922$$

$$\zeta_{nk} := 0.780305$$

$$Py := 8$$

$$Fa := 0.15$$

$$\rho m := 1800$$

$$\rho g := 1.2$$

$$\rho w := 1.2$$

$$de := 5$$

$$H0 := 0.5$$

$$\begin{aligned}
 vn &:= 3.13209 \\
 vk &:= 9.39628 \\
 n &:= 0.333333 \\
 py &:= 0.151017
 \end{aligned} \tag{1.1.1}$$

$$\begin{aligned}
 > \text{"БЛОК 2. Решение"} : \beta_k := \frac{Gm}{vk \cdot \rho m \cdot Sg}; \beta_y := \frac{2 \cdot Gm}{vk \cdot (1+n) \cdot \rho m \cdot Sg}; \psi := \psi_0 \cdot \exp\left(-56.92 \cdot \frac{\sqrt{\beta_y}}{de}\right); \zeta_n := 0.5 + \zeta_{nw}; \zeta_k := \zeta_{nk} + 1.; \zeta_p := \zeta_n + \zeta_k; \\
 &\beta_k := 0.0138256 \\
 &\beta_y := 0.0207384 \\
 &\psi := 0.213508
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 > Le := \frac{\psi \cdot \beta_k \cdot H1 \cdot 1500}{de}; b_0 := n; b_1 := \sqrt{8 \cdot (1+n^2)} - 3 \cdot n - 1; b_2 := 4 \cdot (1+n - \sqrt{2 \cdot (1+n^2)}); \\
 &vs := b_0 + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{6}; us := vs - \sqrt{\frac{vs \cdot (\zeta_p \cdot un^2 - py)}{Le}}; \omega_s := \frac{(us - un)}{r}; \\
 &ws := un \cdot \sqrt{\frac{\text{abs}(0.25 - \zeta_k) + (0.25 + \zeta_n)}{3 \cdot \zeta_0}}; \\
 &Le := 3.54225 \\
 &\omega_s := 0.836673 - 1.16346 \sqrt{9.37366 un^2 - 0.0306586} - 1.16346 un
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 > \text{"БЛОК 3. Решение"} : A := 2 \cdot \left(us - \frac{\omega_s}{r}\right) \cdot \frac{E}{ws \cdot \sqrt{\zeta_0}}; B := \left(1 - \frac{us}{vs}\right) \cdot Le \cdot \frac{E}{ws \cdot \sqrt{\zeta_0}}; a_1 := A + \sqrt{A^2 + B}; a_2 := A - \sqrt{A^2 + B}; \\
 &k_2 := \frac{2 \cdot b_2 \cdot A}{B}; k_1 := \frac{2 \cdot A \cdot (b_1 - k_2)}{B} - \frac{b_2}{B}; a_3 := n - k_1; b_3 := 1 - k_1 - k_2; a_4 := b_1 - k_2; b_4 := b_1 + b_2 - k_2; \\
 &z_1 := \exp(a_1) - \exp(a_2); c_1 := \frac{un \cdot (1 - \exp(a_2)) + (a_3) \cdot \exp(a_2) - b_3}{z_1}; c_2 := \frac{un \cdot (\exp(a_1) - 1) - (a_3) \cdot \exp(a_1) + b_3}{z_1};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 > \text{"БЛОК 4. Решение"} : eq_1 := (\zeta_p \cdot un^2 - py) \cdot \frac{E}{ws \cdot \sqrt{\zeta_0}} - (c_1 \cdot a_1 \cdot (1 - \exp(a_1)) + c_2 \cdot a_2 \cdot (1 - \exp(a_2)) + a_4 - b_4); \\
 &un := \text{fsolve}(eq_1, un, un = 0..1); eq := c_1 \cdot \exp(a_1 \cdot x) + c_2 \cdot \exp(a_2 \cdot x) + b_0 - k_1 + x \cdot (b_1 - k_2) + \frac{b_2 \cdot x^2}{2}; \\
 &us_1 := \text{evalf}(\text{Int}(eq, x = 0..1)); y_1 := \text{diff}(eq, x); \\
 &x_m := \text{fsolve}(y_1, x, x = 0..1); x := x_m; um := eq; Q_m := 3600 \cdot vk \cdot um \cdot Sg; Q_r := 3600 \cdot (um - un) \cdot vk \cdot Sg; Q_0 := Q_m - Q_r; Pa := 0.5 \cdot ((\zeta_k - \zeta_n) \cdot un^2 - py) + ws
 \end{aligned}$$

$$\cdot \frac{\sqrt{\zeta_0}}{2 \cdot E} \cdot (c1 \cdot a1 \cdot (1 + \exp(a1)) + c2 \cdot a2 \cdot (1 + \exp(a2)) + a4 + b4);$$

$$un := 0.125769$$

$$us1 := 0.376176$$

$$xm := 0.607214$$

$$um := 0.503844$$

$$Qm := 1457.71$$

$$Qr := 1093.84$$

$$Q0 := 363.87$$

$$Pa := -0.526042$$

(3)

> "БЛОК 5. Решение" :for x from .0 by 0.1 to 1. do u := x → c1 · exp(a1 · x) + c2 · exp(a2 · x) + b0 - k1 + x · (b1 - k2) + $\frac{b2 \cdot x^2}{2}$; Pω := x → Pa - $\frac{4 \cdot \omega x}{r} \cdot (u(x) - un)$; P := x

$$\rightarrow P\omega(x) - \frac{\sqrt{\zeta_0} \cdot ws}{E} \cdot (c1 \cdot a1 \cdot \exp(a1 \cdot x) + c2 \cdot a2 \cdot \exp(a2 \cdot x) + b1 - k2 + b2 \cdot x); w := x$$

$$\rightarrow \frac{-P(x) + P\omega(x)}{\zeta_0 \cdot ws}; \Delta p := x \rightarrow -P(x) + P\omega(x) \text{ od: } ur3$$

$$:= \frac{3}{(\text{abs}(1 - u2))^3 - (\text{abs}(n - u2))^3} = \frac{2 \cdot Le}{(\zeta_0 \cdot un^2 - py) \cdot (1 - n^2)};$$

> u2 := fsolve(ur3, u2 = 0 .. 1); Q2 := u2 · vk · Sg · 3600;

$$u2 := 0.397848$$

$$Q2 := 1151.05$$

(4)

> "БЛОК 6. Таблица расчетов" :for x from 0. by 0.1 to 1. do evalf(x), evalf(u(x), 8), evalf(w(x), 8), evalf(P(x), 8), evalf(Pω(x), 8), evalf(Δp(x), 8) od;

$$0., 0.12576900, 0.29149103, -0.70218964, -0.526042, 0.17614764$$

$$0.1, 0.22589920, 0.25897953, -0.81830515, -0.66180417, 0.15650098$$

$$0.2, 0.31383172, 0.22409401, -0.91644775, -0.78102804, 0.13541971$$

$$0.3, 0.38833625, 0.18472725, -0.99367592, -0.88204549, 0.11163043$$

$$0.4, 0.44730220, 0.13809390, -1.0454448, -0.96199484, 0.08344996$$

$$0.5, 0.48742985, 0.080368206, -1.0649686, -1.0164022, 0.0485664$$

$$0.6, 0.50376501, 0.0061765814, -1.0422828, -1.0385503, 0.0037325$$

$$0.7, 0.48901267, -0.092124528, -0.96287747, -1.0185482, -0.05567073$$

$$0.8, 0.43253528, -0.22548032, -0.80571558, -0.94197304, -0.13625746$$

$$0.9, 0.31889858, -0.40962146, -0.54036428, -0.78789798, -0.24753370$$

$$1.0, 0.12576699, -0.66719906, -0.12285177, -0.52603927, -0.40318750$$

(5)

> "Часть 2. Объемы аспирации" :

> "Блок 7.Расход воздуха,поступающего по желобу в аспирируемое укрытие,м3/час" :

$$Qg := 3600 \cdot vk \cdot un \cdot Su ; \quad Qg := 363.874 \quad (2.1)$$

> "Блок 8.Расход воздуха,поступающего в аспирируемое укрытие через
неплотности наружной стенки,м3/час" :

$$Qn := 3600 \cdot Fa \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Py}{\zeta n \cdot \rho w}} ; \quad Qn := 1272.79 \quad (2.1.1)$$

> "Блок 9.Расход аспирируемого воздуха,м3/час" :

$$Qa := Qg + Qn; \quad Qa := 1636.66 \quad (2.1.2)$$

**Приложение Б – Копии документов о внедрении результатов
диссертационного исследования**



**Общество с ограниченной ответственностью
«Брянская мясная компания»**

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Крюкова Ильи Валерьевича

Результаты научных исследований аспиранта Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова Крюкова Ильи Валерьевича приняты к внедрению для проектирования систем местной вытяжной вентиляции, при разработке плана модернизации системы обеспыливающей вентиляции.

Разработанные Крюковым И.В. научно-обоснованные предложения позволяют:

- снизить расход воздуха, удаляемого из местного вентиляционного укрытия закрытого типа – аспирационного укрытия, за счет использования явления рециркуляции воздуха между цилиндрической байпасной камерой и перфорированным желобом;
- снизить энергоемкость систем вытяжной вентиляции при конвейерной перегрузке сыпучих материалов;
- эффективно локализовать пылевыведения при переработке сыпучих материалов.

Использование указанных результатов позволяет понизить энергоемкость всей системы обеспыливающей вентиляции.

Главный энергетик _____

Малюков М.М.

МП





ООО «Институт «БелАгроПроект+»

Юридический адрес: 308006, г. Белгород, ул. Щорса, 45
 Почтовый адрес: 308036, г. Белгород, ул. Щорса, 45
 Тел.: 8(4722) 53-73-65 E-mail: belagroproekt@bela.ru
 Р/с: 40702830207900011443 Отделение №8552 Сберегательный банк России г. Белгород
 ОГРН 1133125010240 ИНН 3123324949 КПП 312301001
 К/С 3016181010000000633 БИК 041403633

Справка

об использовании результатов диссертационного исследования
 Крюкова Ильи Валерьевича

Результаты исследований аспиранта Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова Крюкова Ильи Валерьевича использованы для проектирования систем обеспыливания при разгрузочно-погрузочных работах сыпучих сельхозпродуктов.

Разработки Крюкова И.В. дают возможность:

- 1) снизить пылевыведения при погрузке (разгрузке) злаковых и при элеваторных перегрузках до предельно-допустимых концентраций;
- 2) минимизировать объемы аспирируемого воздуха, и как следствие, снизить энергозатраты на эксплуатацию систем вытяжной вентиляции;
- 3) конструировать эффективные местные вентиляционные отсосы закрытого типа;
- 4) проектировать загрузочные устройства для сыпучих пылящих материалов.

Заместитель генерального директора
 ООО «Институт БелАгроПроект+»



В.В. Шаталов