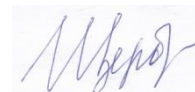


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Тверской государственный технический университет

На правах рукописи



ЩЕРБАКОВА ДАРЬЯ МИХАЙЛОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВСАСЫВАЮЩЕГО СОПЛА ТОРФЯНОЙ ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ
МАШИНЫ**

Научная специальность – 05.05.06 «Горные машины»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент

ЯБЛОНЕВ Александр Львович

ТВЕРЬ – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Краткое описание и особенности технологии уборки фрезерного торфа пневматическим методом	11
1.2 Существующие исследования по теме пневматической уборки торфа	15
1.3 Описание машин для пневматической уборки торфа	22
1.4 Морфологический и параметрический анализ машин для пневматической уборки торфа	39
1.5 Исследование парусности торфяных частиц	42
1.6 Исследование аэродинамических характеристик сыпучих материалов при транспортировании и разделении горных пород	46
1.7 Выводы по главе, цель работы и задачи исследования	48
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ВСАСЫВАНИЯ ТОРФЯНОЙ КРОШКИ СОПЛАМИ ПНЕВМОУБОРОЧНЫХ МАШИН	51
2.1 Скорости воздушного потока на различных участках торфяной пневмоуборочной машины	51
2.2 Спектр всасывания и сопла торфяных пневмоуборочных машин	53
2.3 Силы, действующие на частицу торфа в процессе всасывания	57
2.4 Условия страгивания торфяной частицы с места и ее отрыва от подстилающей поверхности залежи	66
2.5 Выводы по главе 2	69
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНОГО ПОЛЯ ВСАСЫВАНИЯ ТОРФЯНОЙ ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ	70
3.1 Объект и задачи исследования	70
3.2 Приборы, материалы и методика исследования	71
3.3 Результаты исследования	73
3.4 Выводы по главе 3	78

4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ВСАСЫВАЮЩЕГО СОПЛА ТОРФЯНОЙ ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ	80
4.1	Объекты и задачи исследования	80
4.2	Изготовление опытных образцов кондиционной торфяной крошки	81
4.3	Конструкция лабораторной установки для получения аэродинамической характеристики и обоснования рациональных параметров установки всасывающего сопла	84
4.4	Определение скорости витания опытных образцов торфяных частиц	87
4.5	Обоснование параметров установки всасывающего сопла относительно подстилающей поверхности торфяной залежи	89
4.6	Выводы по главе 4	99
5	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МУНДШТУКА НА СОПЛО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВСАСЫВАНИЯ ТОРФЯНОЙ КРОШКИ	101
5.1	Предпосылки экспериментального исследования	101
5.2	Модели мундштуков на всасывающие сопла	105
5.3	Определение скорости воздушного потока по оси всасывающего факела при использовании мундштуков	107
5.4	Определение длины оси активной зоны всасывающего факела при использовании мундштуков	115
5.5	О корреляционной связи длины оси активной зоны всасывающего факела и угла активации расстила	121
5.6	Выводы по главе 5	123
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ	124
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	126
	ПРИЛОЖЕНИЯ	140

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Отечественная продукция, изготовленная на основе фрезерного торфа, пользуется устойчивым коммерческим спросом на Российском рынке и за рубежом. При этом добыча торфа осуществляется как механическим, так и пневматическим методами. Пневматический метод добычи торфа известен еще с 1930-х годов, его явное преимущество перед механическим заключается в том, что продолжительность цикла производства торфа составляет всего один день вместо двух. Поскольку однодневных промежутков с хорошими погодными условиями в течение сезона больше, чем двухдневных, надежность этого метода выше.

Самоходные и прицепные пневмоуборочные машины производились ранее в Советском Союзе из черного металла и имели большую массу и габаритные размеры. Из-за трения торфяной крошки о внутренние стенки желобов возникало статическое электричество, вследствие которого имели место случаи самовозгорания, и, даже взрывы подобных машин. А появление гироскопического момента от вращения рабочего колеса вентилятора при поворотах машины вело к потере устойчивости. Поэтому в 70-80-х годах прошлого века эти машины постепенно перестали использовать. И только на рубеже 1990-2000-х годов, с помощью новых проектов, в частности, Канадской компании «Premier Tech», разработавшей прицепную и самоходную машины SA-200 и SAM-404 с элементами металлоконструкции из нержавеющей стали и алюминиевого сплава, этот метод обрел вторую жизнь благодаря минимальным потерям торфа, отсутствию подфрезеровывания влажной залежи при уборке, ограниченной номенклатуре необходимого оборудования.

В России сегодня нет собственного производства пневмоуборочных машин, но некоторые торфодобывающие компании закупили и используют белорусские машины МПТУ-30 производства РУП «Могилевэнерго» и КТТ-2 производства Эстонской фирмы «Kruviks OU». Эти машины являются

однотипными и различаются лишь в деталях. Практика их использования показала, что машины весьма успешно справляются с верховым торфом, в то время, как при всасывании фрезерной крошки из более плотных, переходного и низинного видов торфа возникают трудности. Поэтому исследование, направленное на повышение эффективности всасывания торфяной фрезерной крошки пневмоуборочными машинами путем обоснованного выбора рациональных параметров установки всасывающего сопла является актуальным и своевременным.

Степень разработанности. Существенный вклад в исследование процессов, развитие и совершенствование техники для пневматической уборки фрезерного торфа внесли работы С.Г. Солопова, К.Ф. Терпиловского, Л.О. Горцакаляна, Н.В. Кислова, М.П. Аршавского, А.М. Зальцмана, В.Л. Лиходиевского, В.М. Пономарева, В.А. Телешева, А.С. Никифорова, В.В. Чернышева, В.П. Савицкого, В.Я. Ильина, А.Н. Болтушкина, В.И. Бакшинского, В.А. Ворзоница, Л.С. Кащенко, В.Н. Серова и др. Все эти исследования, так, или иначе, касались зон транспортирования и разделения торфовоздушной смеси. Исследований, касающихся зоны всасывания крайне мало и полностью отсутствует направление, связанное с обоснованием рациональных параметров установки сопла относительно поверхности торфяной залежи.

Цель работы – обоснование рациональных параметров всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины, способствующих повышению эффективности уборки торфа.

Объекты исследования – всасывающее сопло торфяной пневмоуборочной машины.

Идея работы заключается в повышении эффективности работы пневмоуборочной машины, оцениваемой по критерию длины оси активной зоны всасывающего факела, путем выбора рационального угла установки всасывающего сопла и использования специального мундштука, создающего

лучшие условия для страгивания торфяной частицы с места и последующего ее отрыва от поверхности залежи.

Задачи исследования.

– проанализировать причину отрыва торфяных частиц от подстилающей поверхности при воздействии воздушного потока пневмоуборочной машины;

– разработать и создать лабораторную установку для исследования конструкционных и режимных параметров работы модели всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины;

– провести экспериментальные исследования работы всасывающего сопла пневмоуборочной машины в полевых и лабораторных условиях с целью определения скорости воздушного потока во всасывающем факеле, обосновать рациональные параметры установки всасывающего сопла;

– разработать конструкцию мундштука для всасывающего сопла и обосновать его рациональные параметры.

Методы исследования включают научный анализ и обобщение опыта использования торфяных пневматических машин, а также результатов ранее выполненных работ по пневмоуборке и транспорту торфа; теоретические исследования на базе математического моделирования страгивания торфяной частицы с места и ее отрыва от поверхности залежи; экспериментальные исследования в полевых и лабораторных условиях по оценке эффективности всасывания сопла; обработку экспериментальных данных с применением методов теории вероятности и математической статистики.

Достоверность результатов обеспечивается большим объемом экспериментальных данных с их статистической обработкой, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, расхождение между которыми не превышает 7...8%. Научные результаты и выводы по работе имеют теоретическое обоснование и не противоречат известным научным представлениям о процессе пневматической уборки торфа.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Закономерность изменения скорости воздушного потока от расстояния удаления от всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины КТТ-2 может быть описана с достаточной степенью точности (коэффициент детерминации $R^2 = 0,98$) экспоненциальной функцией.

2. Рациональным следует считать угол установки всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины $30\text{--}35^\circ$. При этом зависимости длины оси активной зоны всасывающего факела от угла установки сопла для верхового и переходного видов торфа имеют полиномиальный вид со степенью полинома 2 при коэффициенте детерминации $R^2 > 0,86$.

3. Тесная, практически функциональная корреляционная связь между длиной оси активной зоны всасывающего факела и углом активации расстила позволяет описать зависимость между ними полиномом второго порядка с коэффициентом детерминации более 0,96. При этом рациональным углом активации расстила по критерию наибольшей длины оси активной зоны всасывающего факела следует считать $55^\circ \leq \beta < 60^\circ$.

Научная новизна работы:

– получены аналитические зависимости скорости воздушного потока, необходимой для страгивания торфяной частицы с места и отрыва ее от подстилающей поверхности от параметров торфяных частиц;

– экспериментально определена скорость всасывания и получена зависимость скорости воздушного потока от расстояния удаления от всасывающего сопла для торфяной пневмоуборочной машины КТТ-2;

– установлено, что плотность частиц переходного торфа (степень разложения $R = 35\text{--}40\%$, среднее содержание влаги $w = 44\%$) максимально допустимой кондиционной фракции (25 мм) в 1,46 раза больше, чем у частиц верхового торфа (степень разложения $R = 5\text{--}10\%$, среднее содержание влаги $w = 44\%$), что отличается от табличных данных. При этом скорость витания торфяных частиц переходного торфа в 1,34 раза больше, чем у частиц верхового торфа;

– разработан метод оценки эффективности всасывания по критерию максимальной длины оси активной зоны всасывающего факела; установлено, что рациональным углом установки сопла по критерию максимальной длины оси всасывающего факела следует считать 30° .

– получены зависимости длины оси активной зоны всасывающего факела от углов установки сопла и активации расстила для фрезерных частиц из верхового и переходного торфа.

Научное значение работы заключается в развитии теории всасывания торфяных фрезерных частиц пневматическим соплом торфоуборочной машины и разработке метода оценки эффективности всасывания по критерию длины оси активной зоны всасывающего факела, позволяющим выбирать наиболее рациональные параметры установки всасывающих сопел с учетом качественной характеристики добываемого торфа.

Практическое значение работы:

– разработана методика оценки скорости воздушного потока, отличающаяся представлением скоростного поля не в виде изотах, а плоскостью, учитывающей одновременно координаты по длине сопла и расстояние удаления от него;

– получен патент на лабораторную установку для исследования аэродинамических свойств торфовоздушной смеси и процессов всасывания торфяной крошки;

– определено, что по критерию максимальной длины оси активной зоны всасывающего факела рациональными являются следующие параметры: угол установки сопла $\alpha = 30\text{--}35^\circ$; угол активации расстила $55^\circ \leq \beta < 60^\circ$; угол атаки расстила $85^\circ \leq \theta < 90^\circ$, соблюдение которых позволяет увеличить время воздействия воздушного потока на торфяную крошку, а, следовательно – повысить производительность пневмоуборочной машины.

Личный вклад автора состоит в анализе и обобщении результатов теоретических и экспериментальных исследований, проведении полевых и лабораторных экспериментов, обработке и интерпретации теоретических и

экспериментальных данных, разработке и создании лабораторной установки, моделей сопла и мундштуков, обосновании рациональных параметров сопла по критерию длины оси активной зоны всасывающего факела.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на 13-й, 14-й и 17-й Международной конференции «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула, 2–3 ноября 2017 г., 30–31 октября 2018 г. и 1–3 ноября 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России» (г. Тверь, 17–19 сентября 2018 г.); 18-й и 19-й Международной научно-практической конференции «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Чтения памяти В.Р. Кубачека» (Екатеринбург, 2–3 апреля 2020 г., 20–21 мая 2021 г.); 5-м Международном инновационном горном симпозиуме PMS-2020 (Кемерово, 19–21 октября 2020 г.); 2-й Международной конференции «Устойчивое развитие Евразийских горных регионов» SDEMR-2021 (Междуреченск, 21–23 сентября 2021 г.); Международной конференции «Современные подходы в инженерных и естественных науках» MAENS-2021 (Тверь, 10 сентября 2021 г.); 30-м Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 01–04 февраля 2022 г.).

Реализация результатов работы. Результаты и методики исследований и рекомендации в полном объеме используются ООО «Пиндstrup» (Псковская обл., Плюсский р-н, п. Заплюсье) при доработке и эксплуатации торфяных пневмоуборочных машин КТТ-2. Также, результаты исследований внедрены в учебный процесс Тверского государственного технического университета в качестве методики проведения лабораторной работы по дисциплине «Нагнетатели и тепловые двигатели» для студентов специальности 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 14 печатных работах, включая 1 статью в изданиях,

индексируемых базами Web of Science и Scopus, 4 статьи в журналах из списка ВАК; получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из общей характеристики работы, пяти глав, заключения и выводов, изложенных на 142 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 13 таблиц, список использованной литературы из 127 наименований и 3 приложения.

Соответствие паспорту научной специальности. По теме и содержанию материалов исследования диссертационная работа соответствует научной специальности 05.05.06 «Горные машины» в части п. 3 области исследований «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов».

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Краткое описание и особенности технологии уборки фрезерного торфа пневматическим методом

Уборка фрезерного торфа может быть осуществлена несколькими методами, каждый из которых уникален в своем применении. Расположение торфяных месторождений на земной поверхности позволяет разрабатывать их открытым способом. Существует две основных схемы добычи торфа: сравнительно тонкими слоями с поверхности залежи и глубокими карьерами на всю глубину торфяного пласта. Согласно первой из этих схем торф извлекают, подрезая верхний слой, согласно второй — экскаваторным способом [1, 2].

Торф по способу добычи и виду конечного продукта подразделяют на: фрезерный, гидроторф, гидроскреперный, багерный, кусковой.

Самое большое распространение из них получил фрезерный способ добычи торфяного сырья из залежи, однако, он является самым чувствительным к изменению погодных условий. Фрезерный торф представляет собой сыпучую смесь мелких частиц разных фракций.

Например, при фрезерном способе методом «раздельной уборки» торф разрыхляется на глубину до 2 см с помощью прицепного, или навесного на трактор оборудования. Такое оборудование представляет собой активный фрезерный барабан или пассивный ножевой фрезер (рыхлитель или плоскорез). Вращаясь вокруг собственной оси и углубляясь в залежь, фрезы снимают небольшой по толщине слой, превращая его в крошку. Разрыхленный таким образом торф сохнет на солнце. Во время сушки торф переворачивается 1–3 раза с помощью ворошилки, которая также является прицепным, или навесным оборудованием. После того, как фрезерный торф достигает нужной влаги, он собирается в валки, расположенные посередине картового поля. Фрезерование, ворошение и валкование образуют, так

называемый, «цикл сбора», длительность которого составляет, как правило, 2 дня. Сразу после валкования начинается новый процесс фрезерования поверхности. Торф, собранный в валки, хуже вбирает влагу и потому остается относительно сухим. После выполнения 4–6 циклов сбора торф, с помощью погрузчика непрерывного действия, оборудованного ленточным конвейером, грузится из валков на тракторные прицепы и доставляется на специальную площадку для последующего складирования в штабели. Фрезерный торф может быть высушен лишь при сухой солнечной погоде, поэтому его добыча возможна только летом на протяжении достаточно короткого периода времени.

Процесс фрезерования используется и для производства кускового топливного торфа. В этом случае торфяная залежь экскавируется из залежи дисковой фрезой с глубины до 550 мм, одновременно интенсивно перемешиваясь, а затем формуется в куски необходимых размеров, которые выстилаются на поле [2].

Как известно, количество солнечных дней, благоприятных для сушки торфяного сырья в течение сезона, весьма ограничено. Еще меньше в сезоне двухдневных промежутков с солнечной погодой, необходимых для производства торфа механическими методами, поэтому в целом, надежность всех методов с механической уборкой невысока.

С конца 20-х годов прошлого века стал известен пневматический метод уборки фрезерного торфа с помощью пневматических комбайнов. Он представляет собой уборку торфа без валкования, прямо из расстилы, в бункер машины с помощью турбулентного потока воздуха, создаваемого пневматической установкой [1]. Данный метод применяется при добыче торфа для брикетирования, удобрений и подстилки и позволяет сократить цикл производства (в т. ч. и уборки) торфа до 1 дня из-за меньшей глубины фрезерования (5–10 мм), в результате чего слой сфрезерованной торфяной крошки сохнет быстрее, а ворошение, чаще всего, вообще не требуется. Естественно, что при такой глубине фрезерования, цикловой сбор почти в

два раза меньше, чем при уборке механическими методами. Поскольку однодневных промежутков с хорошей погодой в сезоне значительно больше, чем двухдневных, то надежность метода с пневматической уборкой выше, чем методов с механической уборкой. Однако, увеличившееся количество циклов, которые необходимо осуществить для уборки такого же количества торфа, какое убирается механическим методом, сводит практически на нет все эти преимущества. При такой ситуации вопрос относительно большей эффективности пневматического или механического метода уборки определяется исключительно погодными факторами. Тем не менее, метод особенно эффективен на небольших предприятиях площадью до 35 га.

В основе пневматического метода лежит применение пневмоуборочной машины (комбайна). Сбор фрезерного торфа с поверхности поля производится путем засасывания торфяной крошки из растила во время передвижения машины. Особенностью данного процесса является то, что при его осуществлении отсутствует механическое воздействие рабочих органов машины на подстилающий грунт и убираемую продукцию. Вследствие этого здесь отсутствует эффект подфрезеровывания залежи рабочими органами уборочных машин, а тем самым – и увлажнение убираемого фрезерного торфа.

Применение струи воздуха позволяет засасывать наиболее сухие частицы торфяной крошки из верхней части растила с оставлением нижних, более влажных зон, соприкасающихся с залежью. При этом за счет изменения рабочих скоростей пневмоуборочной машины и режима работы вентилятора представляется возможным в определенных пределах регулировать количество собираемого торфа и его влагу в зависимости от метеорологических условий, состояния полей добычи и качественной характеристики торфяной залежи. Пневматический метод уборки позволяет получать кондиционную продукцию в тех случаях, когда сбор фрезерного торфа другими машинами затруднен (например, при небольших площадях и др.). При пневматическом методе уборки фрезерного торфа с поверхности

поля существенным образом изменяется принятый в настоящее время технологический процесс добычи, создаются важные предпосылки для лучшего использования метеорологических условий сезона и гибкого использования благоприятных его периодов для добычи торфа.

Пневматическая уборка обеспечивает производство фрезерного торфа в условиях ограниченной номенклатуры необходимой техники: требуется лишь пневмоуборочная машина, оснащенная, как правило, пассивным фрезером. При проходе такой машины по карте обеспечивается совмещение операций: расстил фрезерной крошки собирается в бункер, а навешенный сзади, или прицепленный фрезер сразу же открывает новый цикл.

Однако необходимо отметить, что пневматическая уборка фрезерного торфа не приводит к какому-либо новому способу добычи, так как в этом случае остаются неизменными основные положения фрезерного способа добычи – мелкое послойное фрезерование, отсутствие дальнейшей переработки и сушка торфяной крошки непосредственно на месте ее добычи.

Анализ технической характеристики пневматической уборочной машины выявляет сравнительно большой расход энергии на единицу массы транспортируемого материала. Тем не менее, несмотря на это, пневматическая уборка обладает качествами, которые позволяют ей выгодно отличаться от механических видов, например, простотой конструкции машин. Применение пневматического транспорта в торфобрикетном производстве позволяет значительно упростить технологические схемы, снизить металлоемкость и резко уменьшить капитальные затраты при строительстве новых и реконструкции действующих заводов. Герметичность пневмоустановок обеспечивает уменьшение потерь торфа, способствует улучшению культуры производства и санитарно-гигиенических условий труда. В результате, в целом ряде случаев при применении пневматического транспорта и при сравнительно больших затратах энергии, общие затраты оказываются меньше, чем при применении других видов транспорта.

Особенностью технологии добычи фрезерного торфа пневматическим методом является уборка торфа непосредственно из расстила в бункер турбулентным потоком воздуха, создаваемым пневматической установкой машины. Главным преимуществом данного метода является продолжительность цикла в один день.

В истории развития отечественной торфяной отрасли на долю пневматической уборки приходится не более 5 % количества убираемого торфа. За рубежом (в Финляндии, Канаде, Беларуси) в наши дни используют пневматические торфоуборочные машины малой производительности, что связано с небольшими объемами добычи.

1.2. Существующие исследования по теме пневматической уборки торфа

На сегодняшний день произведено множество исследований по теме пневматической уборки фрезерного торфа. Значительный вклад в развитие и совершенствование техники пневматической уборки фрезерного торфа внесли исследования С.Г. Солопова, К.Ф. Терпиловского, Л.О. Горцакаляна, Н.В. Кислова, М.П. Аршавского, А.М. Зальцмана, В.Л. Лиходиевского, В.М. Пономарева, В.А. Телешева, А.С. Никифорова, В.В. Чернышева, В.П. Савицкого, В.Я. Ильина, А.Н. Болтушкина, В.И. Бакшинского, В.А. Ворзоница, Л.С. Кащенко, В.Н. Серова и др.

Все исследования в этой области условно можно разбить на две группы: исследование, совершенствование и оптимизация конструкций машин и исследование физико-химических свойств торфяного сырья [4].

Большее количество исследований первой группы было посвящено изучению работы всасывающего сопла, аэродинамики всасывания торфяной крошки, активизации слоя фрезерной крошки воздушным потоком и механической щеткой, процессу транспортирования, расчёту сопротивления движению с малой и высокой концентрациями в поворотах трубопроводов, исследованию отделения торфяной крошки от аэросмеси. Проводились

работы и по исследованию эффективности применения стеклопластиков в узлах пневматических комбайнов [3].

Вторая группа исследований посвящена изучению физико-химических свойств торфяной крошки как в расстиле, так и непосредственно в процессе пневматической уборки с оценкой взаимодействия частиц торфа как между собой, так и с внутренними поверхностями всасывающих сопел и воздухопроводов.

Исследования по пневматическому транспорту и аэродинамическим свойствам сыпучих сред (в т. ч. торфяных) выполнены А.О. Спиваковским, А.Б. Горенштейном, Л.О. Горцакаляном, Д.Н. Жилиным, В.Я. Ильиным, Н.В. Кисловым, В.М. Наумовичем, Н.С. Панкратовым, В.М. Пономаревым, В.П. Савицким, М.И. Сарматовым, В.Н. Серовым, В.В. Шавелем, М.П. Калинушкиным, М.Ф. Бромлеем и др.

Одним из основных вопросов успешной и экономичной работы установок пневмотранспорта сыпучих материалов являются правильная оценка потерь давления в трубопроводах, обоснованный выбор скорости воздушного потока и концентрации аэросмеси, которые обеспечивают наименьший расход энергии при устойчивом транспортировании с заданной производительностью.

К числу первых работ по методике расчета пневматических транспортных установок относится исследование В. Блесса [4]. Автор этой работы разделяет потери давления при пневматическом транспортировании на потери при движении чистого воздуха материала в движущемся воздухе. Приняв допущения о равенстве скоростей движения материала и воздуха и равенстве их коэффициентов сопротивления в формуле Дарси для однофазной жидкости, В. Блесс получил зависимость:

$$P_{\text{см}} = P \cdot (1 + \mu), \quad (1.1)$$

где $P_{\text{см}}$ – потери давления при движении аэросмеси; P – потери давления при движении воздуха; μ – расходная концентрация.

Г.Р. Каргом данная формула (1.1) была экспериментально проверена для пневматического транспортирования измельченных древесных отходов, и дала удовлетворительные результаты при незначительной объемной концентрации смеси (менее 1:12 000) [5]. Формула (1.1) использовалась В.П. Жоховским в работах по расчету пневматического транспорта лужги и В.И. Колычевым в направлении механизации транспорта массовых грузов в сельском хозяйстве [6, 7].

В настоящее время метод Блесса устарел и не применяется для расчета пневматических транспортных установок.

П.С. Козьмин, А.Е. Львович, К.М. Гринев, М.Х. Дорфман и др. вывели формулу потерь давления без допущений, сделанных В. Блессом [8]:

$$P_{\text{см}} = P \cdot \left(1 + \beta \frac{v_M^2}{v^2} \mu\right), \quad (1.2)$$

где $\beta = \lambda_M / \lambda$ – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств перемещаемого материала, от характера сопротивления движению и от характера самого движения; λ_M – коэффициент сопротивления, соответствующий дополнительным потерям давления P_M , вызванным наличием материала; λ – коэффициент сопротивления, соответствующий потерям давления P при движении воздуха; v_M – скорость материала; v – средняя скорость воздушного потока.

В работах В. Барта, А.М. Дзядзно, П. Кенигсмана, А.Е. Смолдырева, Я. Урбана [9–17] рекомендуется при определении потерь давления использовать принцип наложения, т. е. суммирования, потерь P при движении чистого воздуха и дополнительных потерь P_M , возникающих благодаря наличию материала в потоке. При этом обе составляющие $P_{\text{см}}$ вычисляются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$P_{\text{см}} = P + P_M = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} + \lambda_M \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \mu = (\lambda + \lambda_M \mu) \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1.3)$$

где D – диаметр трубопровода; L – длина трубопровода; v – средняя скорость воздушного потока; ρ – плотность воздуха.

В работах К.И. Стаховича, Б.И. Броунштейна, О.М. Тодеса, В.А. Успенского, Л.С. Клячко и С.И. Часс теоретически выводится уравнение и предлагаются зависимости для определения опытного коэффициента сопротивления движению аэросмеси K , обуславливающего пропорциональность между скоростью трогания с места и витания [18–23]:

$$K = \frac{2gD}{\lambda v v_m} \cdot \frac{v_{от}^2}{v_s^2}, \quad (1.4)$$

где K – опытный коэффициент сопротивления движению аэросмеси (коэффициент Гастерштадта); $v_{от}$ – относительная скорость; v_s – скорость витания частиц; g – ускорение свободного падения

Основываясь на опытных данных Л.М. Шварцмана, С.И. Часс приняла, что в горизонтальном трубопроводе относительная скорость $v_{от}$ остается величиной постоянной и равной скорости $v_{тр}$ трогания. По данным А.Е. Смолдырева для заданного вида продукта:

$$v_{тр} = K_T v_s. \quad (1.5)$$

Тогда для горизонтального трубопровода:

$$K = \frac{2gDK_T^2}{\lambda v(v - K_T v_s)}, \quad (1.6)$$

где K_T – опытный коэффициент, не зависящий от средней скорости воздушного потока v .

М.П. Калинушкин впервые показал, что на величину потерь давления в трубопроводах влияет характер движения материала. В результате взаимодействия закрученного воздушного потока материал может совершать не плоское скачкообразное движение, а винтовое. В результате такого движения потери давления на трение частиц о стенки трубы возрастают. В работе указывается, что для «закручивания потока вовсе не требуются какие-либо аппараты – отвод или иное местное сопротивление может быть причиной возникновения крутки» [24].

Согласно методике расчета высоконапорных установок пневмотранспорта, разработанной во ВНИИПТМАШе, свойства

транспортируемого материала оказывают влияние на выбор транспортирующей скорости потока и не учитываются при определении потерь давления в трубопроводах. Таким образом можно сделать вывод об отсутствии обобщенных зависимостей для определения K и $\lambda_{\text{см}}$ при транспортировании любых материалов, а приведенные формулы справедливы только для тех условий, в которых они получены.

Впервые пневматически транспорт фрезерного торфа был осуществлен в конце 20-х годов прошлого века инженерами Е.В. Чарнко, С.Г. Солоповым и М.И. Сарматовым на всасывающей установке немецкой фирмы «МАГАГ». Установка предназначалась для транспортирования зерна. Проведенные исследования показали принципиальную возможность транспортирования фрезерного торфа пневматическим способом с довольно высокими концентрациями ($\mu = 8,7$).

В 1933 году под руководством С.Г. Солопова испытывался пневматический комбайн, предназначенный для уборки и транспортирования фрезерного торфа. В трубопроводе $D = 200$ мм была достигнута концентрация $\mu = 9 - 10$. По результатам экспериментальных исследований С.Г. Солоповым была написана работа, в которой отмечается, что потери давления на прямых участках трубопроводов при транспортировании фрезерного торфа могут определяться по уравнению И. Гастерштадта:

$$P_{\text{см}} = P(1 + K\mu) = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} (1 + K\mu). \quad (1.7)$$

где K – опытный коэффициент сопротивления аэросмеси, «коэффициент Гастерштадта».

Полученные значения коэффициента $K = 0,8$ для $D = 200$ мм, $v = 46$ м/с и $\mu = 9,8$ требовали дальнейшего изучения.

В 1957 году ГИПРОТОППРОМом проводились эксперименты по транспортированию фрезерного торфа с помощью всасывающей установки ($D = 200$ мм, $L = 22$ м) из вагонов в бункер торфобрикетного завода. Полученный высокий удельный расход энергии (4,4 кВт·ч/т) объясняется

малой концентрацией ($\mu = 0,4 - 0,5$) при довольно высокой скорости воздуха в трубопроводе ($v = 25$ м/с).

Обширные теоретические и экспериментальные исследования по пневматическому транспортированию фрезерного торфа в горизонтальных трубопроводах выполнил Л.О. Горцакалян.

Экспериментально установлено, что с уменьшением плотности и крупности частиц транспортируемого торфа коэффициент K возрастает. Это объясняется в диссертационной работе Л.О. Горцакаляна «Исследование процесса транспортирования фрезерного торфа пневматическим способом с различными концентрациями аэросмеси». Так же в работе приведены рекомендации для выбора необходимой транспортирующей скорости воздушного потока, обеспечивающего устойчивое транспортирование как в горизонтальном, так и в вертикальном трубопроводах [25]:

$$v_p = (1,5 - 2)v_{sp}, \quad (1.10)$$

где v_{sp} – скорость витания наиболее крупных торфяных частиц.

При транспортировании материала важной характеристикой является скорость транспортирования – скорость воздушного потока, обеспечивающая надежное и экономичное перемещение материала [26]. Скорость транспортирования, в первую очередь, зависит от концентрации аэросмеси и скорости витания частиц материала.

Скорость витания исследовалась в работах Л. О. Горцакаляна, В.Я. Ильина, С.Г. Солопова, В.Л. Лиходиевского, Н.В. Кислова. А предложенные зависимости Н.В. Кислова позволяют с достаточной точностью определить скорость витания торфяных части различных размеров, плотности и влажности [27–30].

Ф.А. Опейко предложил определить потери давления в трубопроводах при движении аэросмеси, как функцию произведения тензоров деформаций и напряжений в потоке, и разработал метод определения этих тензоров только для движения чистого воздуха в ламинарном режиме [31].

В.М. Пономарев установил, что при малых концентрациях ($\mu \leq 5$) торфо-воздушной смеси потери давления в отводах изменяются пропорционально концентрации, а при больших концентрациях ($\mu = 5 - 15$) – пропорционально $\mu^{1,4}$. Поэтому в зависимости от μ рекомендуется два экспериментальных уравнения для определения потерь давления в плавных и сегментных отводах [32]. В работе В.П. Савицкого подтверждается пропорциональность потерь давления в отводах концентрации $\mu \leq 2$ [33].

В диссертации В.Я. Ильина обобщены имеющиеся и получены новые данные по пневматическому транспортированию фрезерного торфа в повышенных концентрациях по горизонтальным трубопроводам. Автором выведена аналитическая формула для определения K , аналогичная (1.8), и получены эмпирические формулы для определения K_T [34]:

Для верхового торфа

$$K_T = a_B + 0,06v; \quad (1.13)$$

Для низинного торфа:

$$K_T = b_H + 0,05v, \quad (1.14)$$

где a_B и b_H – опытные коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. – Значения опытных коэффициентов a_B и b_H

Значения коэффициента a_B для верховых торфов								
$R, \%$	25	25	25	20	30	30	40	
$w, \%$	20	30	40	32	32	40	32	
a_B	0,465	0,48	0,50	0,58	0,77	0,40	0,63	
Значения коэффициента b_H для низинных торфов								
$R, \%$	35	45	45	50	50	50	50	50
$w, \%$	41	40	55	20	40	45	49	55
b_H	0,55	0,25	0,38	0,56	0,64	0,6	0,37	0,20

Анализ приведенных данных показывает, что закономерность изменения коэффициентов a_B и b_H от степени разложения и влаги не прослеживается. Обращает на себя внимание незначительная разница в их значениях, особенно для образцов верхового торфа.

Для определения $v_{кр}$ приведены эмпирические формулы, устанавливающие зависимость критической скорости от концентрации и качественных характеристик транспортируемого торфа:

$$v_{кр} = 27,1 - 1,4v_{сп} + 0,17\mu. \quad (1.15)$$

Однако, исследование работ показало, что рекомендации по определению значений K , v_p или $v_{кр}$ противоречивы, а данные по определению потерь давления и выбору оптимальной транспортирующей скорости в вертикальных трубопроводах при транспортировании фрезерного торфа вовсе отсутствуют.

1.3. Описание машин для пневматической уборки торфа

Пневматическая торфоуборочная машина предназначена для уборки фрезерного торфа пневматическим способом из расстила в штабель с одновременным фрезерованием верхового слоя торфяной залежи, транспортированием собранного торфа и выгрузкой его из бункера. Различают 2 типа подобных машин – бункерный пневматический комбайн и прицепная пневмоуборочная машина. Бункерный пневматический комбайн – самоходная машина, состоящая из рабочего органа, рамы на гусеничном или колесном ходу, на которой смонтирован бункер, пневматическая загрузочная система и разгрузочное устройство, прицепного фрезерного барабана и трансмиссии с двигателем. Прицепная пневмоуборочная машина не является самоходной и не имеет двигателя и трансмиссии.

Рабочим органом является пневматическая установка, выполненная по всасывающей схеме и включающая: всасывающие сопла с трубопроводами,

циклоны для отделения торфа из воздушного потока и центробежный вентилятор. Засасывание торфа производится соплами прямоугольного сечения на шарнирной подвеске, установленными впереди машины. При уборке торфа с большим количеством древесных включений к нижнему листу сопла прикрепляют специальную гребёнку, зубцы которой предохраняют входную щель сопла от засорения. При уборке сыпучего торфа сопло опирается на расстил своей нижней плоскостью, волокнистого — установленными по бокам опорными катками, с помощью которых регулируется расстояние между расстилом и входной щелью сопла, устраняется накапливание комков торфа впереди сопла и обеспечивается уборка наиболее сухих частиц. Сопла при помощи трубопроводов присоединены к вертикальным циклонам. Количество торфа, собираемого из расстила, регулируется скоростью всасывания и поступательной скоростью машины. При работе вентилятора в машине создаётся разрежение, и наружный воздух устремляется во входную щель движущегося по расстилу сопла, увлекая за собой фрезерную крошку. Пройдя сопло, смесь воздуха с торфом попадает в вертикальный трубопровод, по нему — в торфоотделитель, представляющий собой циклонную систему, установленную в бункере. В циклоне торфовоздушная смесь приобретает винтовое движение. Частицы торфа под воздействием центробежной силы прижимаются к стенкам и оседают в бункере. В торфоотделителе осаждаются 95–98 % торфа, поступившего в циклон. Нижний пояс бункера может являться одновременно рамой ленточного конвейера, верхняя ветвь которого проходит по дну бункера, а нижняя (холостая) под бункером на роликах. Плотность торфа в бункере увеличивается на 18–20 % за счёт большой скорости поступления и дополнительного уплотнения в процессе движения комбайна. Торф выгружается из бункера через люк в стенке с помощью разгрузочного устройства — ленточного конвейера, или путем опрокидывания бункера набок. Количество торфа, собранного пневматической торфоуборочной машиной, зависит от ширины захвата и влажности торфа в расстиле. Созданы

пневматические комбайны с рециркуляцией или поддувом воздуха, позволяющие уменьшить потери фрезерного торфа от уноса в атмосферу, снизить расход энергии на уборку и повысить цикловой сбор.

Поскольку пневматический способ уборки фрезерного торфа был впервые предложен и испытан в СССР, с 1927 года авторами послойно-поверхностного способа добычи фрезерного торфа начаты экспериментально-конструкторские работы в области пневматической уборки фрезерного торфа. В 1929 году была испытана немецкая пневматическая машина МАГАГ, предназначенная для погрузки фрезерного торфа.

В 1930 году советскими инженерами С. Г. Солоповым, М. И. Сарматовым и Е. В. Чарнко сконструирован первый пневматический комбайн, который положил начало развитию пневматической уборки фрезерного торфа [35]. В 1932 году создана и изготовлена первая пневмоуборочная машина получившая название «Пневматический комбайн ИНСТОРФа». Этот комбайн представлял собой самоходную машину, состоящую из пневматической части и фрезерного барабана, прицепляемого к машине сзади (рисунок 1.1).

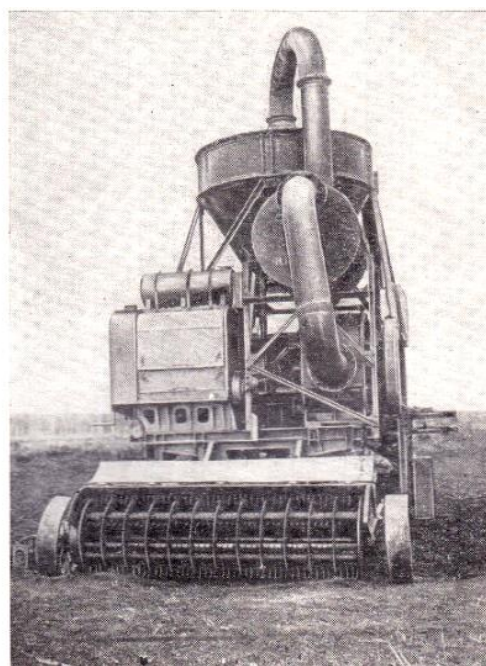
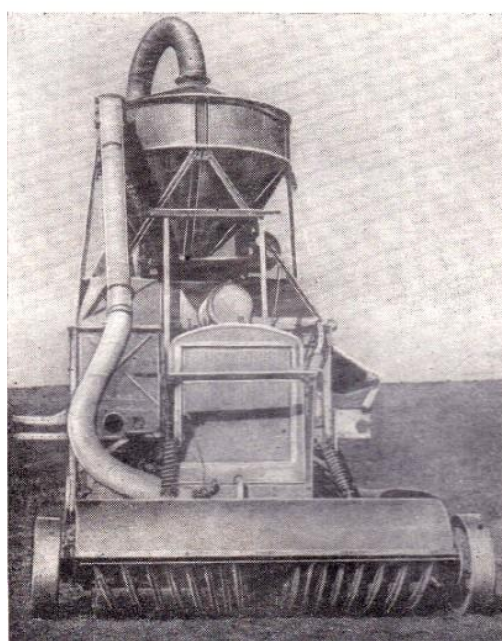


Рисунок 1.1 – Пневматический комбайн ИНСТОРФа

Однако, испытания комбайна в последующие 2 года не принесли положительных результатов. Причиной послужили недостаточная работоспособность сопел и неудачной конструкции фильтров. Как следствие, цикловые сборы оказались низкими при значительном расходе энергии на 1 т убранный торфа. Исходя из общего состояния работ, проведенных с пневматическим комбайном Инсторфа, экспериментаторами был сделан вывод, что «как с эксплуатационной, так и с экономической точек зрения применение пневматики для уборки фрезерного торфа является явно невыгодным». В связи с этим, экспериментальные работы с пневматическим комбайном и с пневматической уборкой фрезерного торфа были прекращены. Но приемочная комиссия не согласилась с данным решением и рекомендовала продолжить работы в области пневматической уборки с использованием опыта проведенных испытаний и практики пневматического транспортирования других видов сыпучих материалов.

Дальнейшая реализация работ по пневматической уборке усложнилась отсутствием отечественных двигателей необходимой мощности, что в итоге привело к прекращению работ по пневматическому комбайну Инсторфа. Таким образом, закончился первый этап развития пневмоуборочного способа добычи фрезерного торфа, принеся с собой вопросы о недостаточном исследовании возможности уборки фрезерного торфа с помощью воздушной струи непосредственно из тонких слоев расстила без подфрезеровывания залежи.

В.М. Серов предложил ускорить сушку фрезерного торфа путем применения струи воздуха. Данное предложение предусматривало продувание при помощи насадок слоя торфа струей воздуха со скоростью 5 м/с, при этом предполагалось, что частицы размером не превышающим 5 мм поднимаются в воздух над поверхностью поля и могут быть собраны в валик или кузов машины. Аналогичным образом, но при большей скорости струи воздуха, может происходить уборка более крупных подсушенных частиц

фрезерного торфа. Но и эти теоретические исследования не принесли должного результата.

После окончания Великой Отечественной войны начался второй этап развития пневматической уборки фрезерного торфа. Интерес к этому способу объяснялся значительным расширением масштаба добычи торфа и стремлением улучшить основные технико-экономические и качественные показатели фрезерного способа добычи.

С 1946 по 1950 гг. ВНИИТП (Всесоюзным научно-исследовательским институтом торфяной промышленности) был выполнен значительный объем конструкторских и экспериментальных работ по созданию модельной пневматической установки и опытных пневмоуборочных машин: прицепной к трактору машины ПУМ и самоходной с двигателем внутреннего сгорания ПУМ-2 (рисунок 1.2).

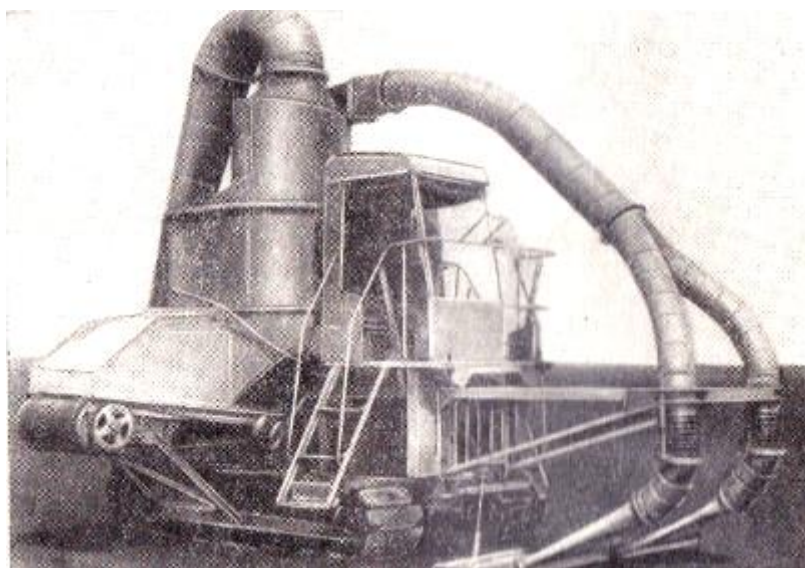


Рисунок 1.2 – Торфяная пневмоуборочная машина ПУМ-2

Пневмоуборочные комбайны ПУМ по своему типу являлись бункерными, работали по всасывающей системе, и пылеотделение в них осуществлялось по схеме «циклон + бункер».

С 1951 по 1955 гг. ВНИИТП проводились большие работы по созданию и опытно-производственной проверке электрифицированных

пневмоуборочных комбайнов КПФ (рисунок 1.3), осуществляющих одновременно с уборкой фрезерование торфяной залежи на убранной полосе.

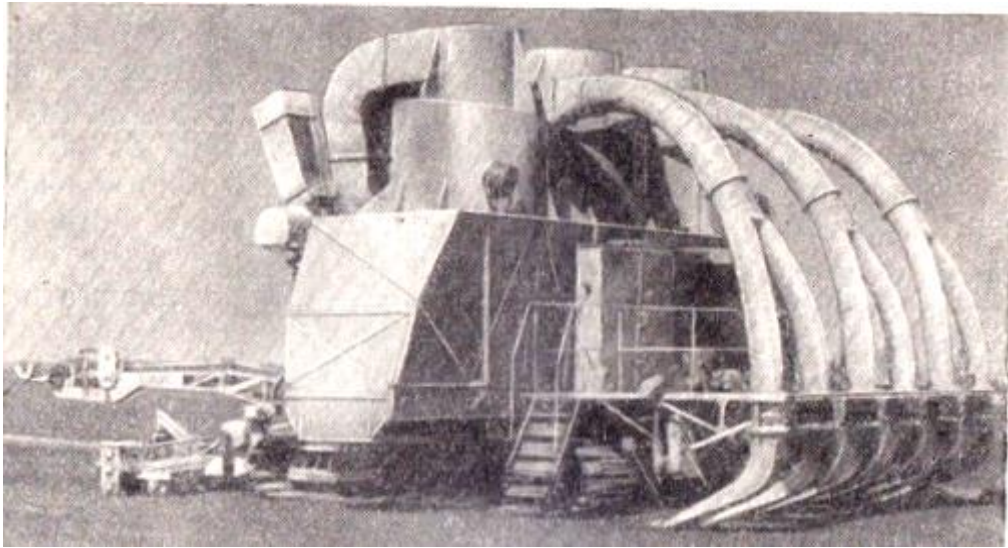


Рисунок 1.3 – Электрифицированный пневматический комбайн КПФ-3

Кроме того, совместно с Шатурским торфяным трестом ВНИИТП работал по созданию и испытанию машин ПУМ-3Э, являющейся электрифицированной моделью ПУМ-2 (оборудованной фрезерным барабаном), а Шатурский торфяной трест совместно с филиалом ЦАГИ – над моделью машины ПУМ-4Э (рисунок 1.4).

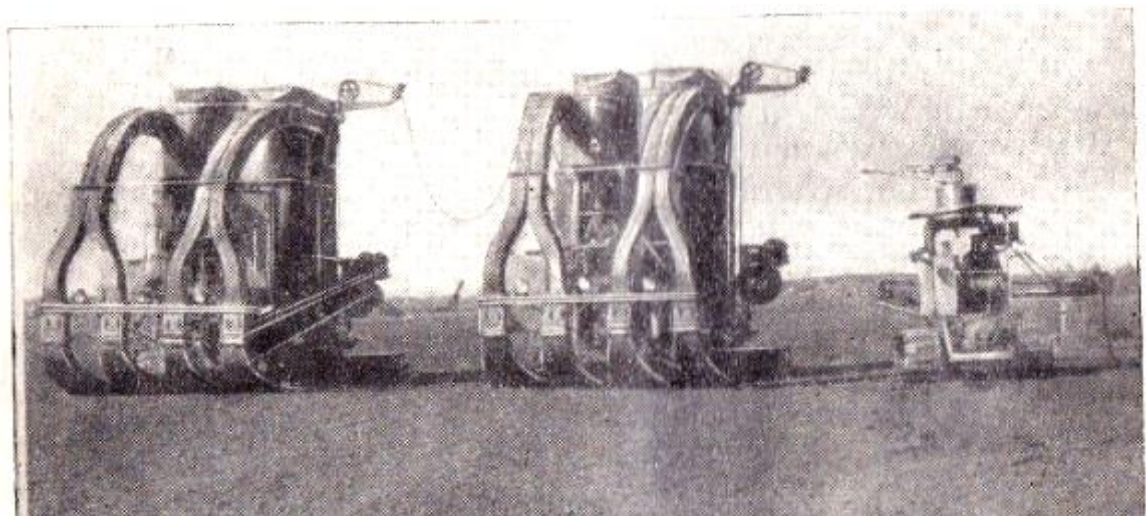


Рисунок 1.4 – Комплект электрифицированных пневмоуборочных комбайнов ПУМ-4Э

Электрифицированные комбайны КПФ работали по индивидуальной схеме электропитания, электрифицированные машины ПУМ – по групповой. Электроэнергия в обоих случаях подводилась при помощи гибкого кабеля. Данные машины работали колоннами, состоящими из двух машин и одного самоходного электрогенератора ЭПС-1.

Машины включала в себя 2–4 сопла с механизмом уравнивания, расположенных впереди машины, вентилятора с редуктором, воздухопроводов, бункера с циклоном и подвижным дном, гусеничного хода, трансмиссии, и фрезерного барабана [36].

Помимо конструкторских решений проводились экспериментальные работы по исследованию, проверке и уточнению элементов технологии добычи фрезерного торфа с применением пневмоуборочных машин и некоторые полевые и лабораторные работы.

Так в 1951–1952 гг. под руководством и при непосредственном участии Н.Д. Чубарова были разработаны временные технологические нормативы добычи фрезерного торфа пневмоуборочными машинами и проведен ряд экспериментальных работ: по сушке фрезерной крошки в расстиле, определению сбора в зависимости от режима работы пневмоуборочных машин и по другим вопросам технологии.

В 1952 году Л.С. Кащенко и Б.В. Фадеевым и др. (ВНИИТП) были проведены лабораторно-полевые работы по исследованию вопросов, связанных с аэродинамическими параметрами пневмоуборочных машин и влиянием этих параметров на некоторые технологические показатели пневматической уборки.

Из-за сложности решения электрификации машин при кабельном питании электрические пневмоуборочные машины не получили распространения в торфяной промышленности и было принято решение ориентироваться на создание пневматических комбайнов с приводом от дизеля, так создавался новый комбайн КПФ-6,4 с производительностью в 2 раза большей по сравнению БПФ-2М.

С 1956 по 1958 гг. А.Б. Горенштейном был создан опытный пневматический комбайн БПФ-1 с приводом от дизеля ЯАЗ-206. Первую партию БПФ-1 выпустил завод Кузхиммаш в 1959 году, а с 1960 года подобные комбайны (БПФ-2М) начали выпускать заводы «Двигатель революции» и Ивторфмаш.

Основу конструкции машины БПФ-3М (рисунок 1.5) составляют 4 всасывающих сопла, плотно прилегающих к поверхности торфяной залежи, 2 транспортных трубопровода, через которые торфяная крошка поступала в 2 соответствующих циклона, после чего попадала в герметично закрывающийся бункер.



Рисунок 1.5 – Пневматический комбайн БПФ-3М: 1 – всасывающие сопла; 2 – транспортные трубопроводы; 3 – циклон; 4 – бункер

Сопло имело сварную конструкцию и изготавливалось из листовой стали (рисунок 1.6). Для плавности входа воздуха в сопло у верхней его кромки устанавливался козырек с профилем, очерченным по плавной кривой. Сопло свободно располагалось на торфяной залежи и имело гибкое соединение с транспортным трубопроводом, что позволяло максимально копировать рельеф поверхности залежи. Подъем сопел в машине БПФ-3М в транспортное положение осуществлялся с помощью двух пневмокамер,

установленных на кронштейнах рамы сопел. К каждому соплу был присоединен вертикальный транспортный трубопровод квадратного сечения, верхние концы которого попарно соединены с тройником Y-образной формы. Трубопроводы, изгибаясь в виде отвода (плавного поворота), присоединены к входному патрубку циклона.

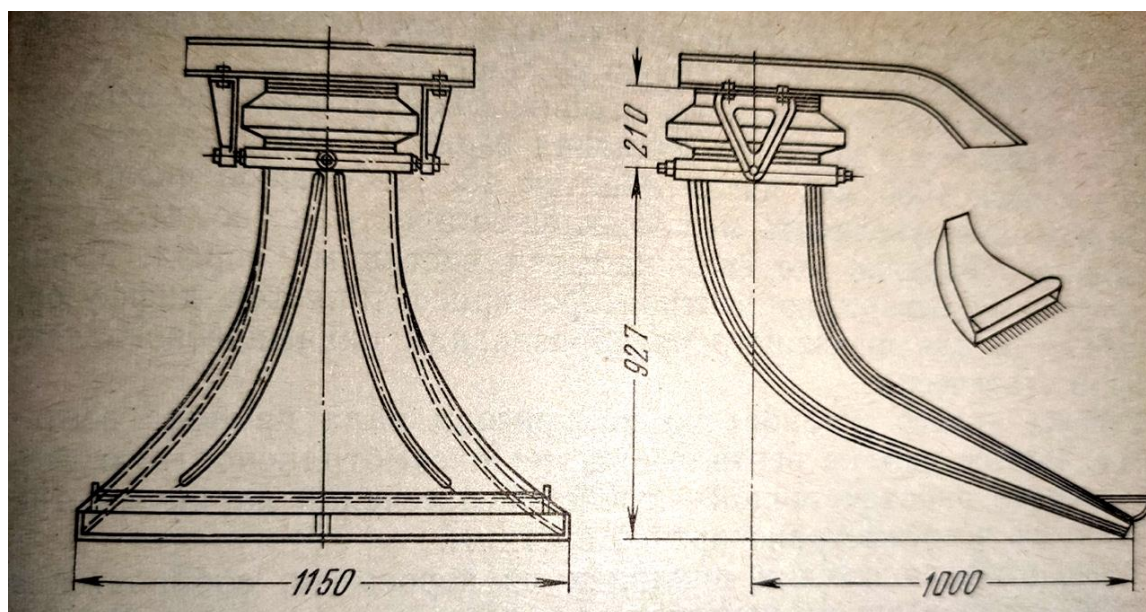


Рисунок 1.6 – Сопло пневматического комбайна БПФ-3М

Пневматический комбайн БПФ выпускался разными модификациями под марками БПФ-1, БПФ-2, БПФ-2М, БПФ-2А, БПФ-3М, БПФ-5 и др.

Существовали образцы пневмоуборочных машин, например, КПФ-6,4 (рисунок 1.7), в которой повышение производительности осуществлялось за счет установки двух дополнительных сопел, что увеличило ширину захвата на 1,6 м (6,4 м) по сравнению с БПФ [37]. Основным элементом пневмобункерного комбайна являлась пневматическая установка, включающая в себя вентилятор, сопла, трубопроводы и циклоны-отделители. В установке имелся герметично закрывающийся бункер с дном в виде ленточного или скребкового конвейера, автомата для учета собранного торфа и трансмиссии, приводимой от двигателя внутреннего сгорания. Сзади к бункерному комбайну прицеплялся фрезерный барабан. КПФ-6,4 производил

уборку высушенного слоя фрезерного торфа и одновременно фрезеровал новый слой торфяной залежи, открывая новый цикл. Уборка фрезерного торфа осуществлялась во время движения комбайна путём засасывания торфяной крошки через сопла и транспортирования торфовоздушной смеси по трубопроводам в циклон. В последнем торфяные частицы отделялись от воздуха и падали в бункер, в котором транспортировались к штабелю и выгружались. Характерной особенностью пневматической установки являлась возможность рециркуляции воздуха: отделенный от фрезерного торфа воздух подавался по дополнительным воздуховодам в зону засасывания соплами, обеспечивая «активизацию» торфяного расстила, в результате чего, скорость всасывания, необходимая для работы машины в нормальном режиме, требовалась меньшая. Отсюда – и меньшие удельные энергозатраты на получение готовой торфяной продукции. Кроме того, несмотря на значительное усложнение конструкции, рециркуляция воздуха позволяла значительно понизить выбросы пыли в атмосферу.

Комбайн перемещался по кольцу; цикл его работы состоял из рабочего прохода (около 450 м) по карте (участку), подъезда к штабелю, выгрузки торфа из бункера и переезда на другую карту [38].



Рисунок 1.7 – Бункерный торфяной пневмоуборочный комбайн КПФ-6,4

Следующей прицепной пневмоуборочной машиной стала ППФ – машина для торфяной подстилки (рисунок 1.8). Основными узлами ППФ-3 являлись пневмосистема, бункер и гидросистема управления. Пневматическая система машины включала в себя два всасывающих сопла, один циклон, два трубопровода и вентилятор [39].

Машина имела пассивный гусеничный ход с двумя балансирующими каретками в каждой гусенице.

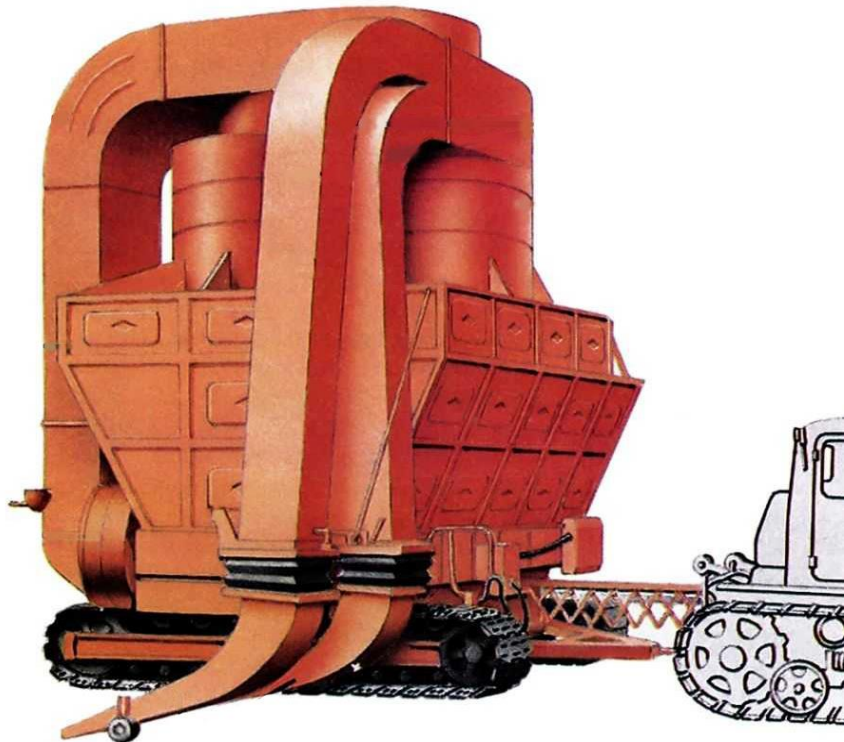


Рисунок 1.8 – Прицепная пневмоуборочная машина ППФ-3

На базе пневматического комбайна БПФ-5 Ивановским СКБ «Торфмаш» был разработан гидрофицированный пневматический комбайн с рециркуляцией воздуха, обеспечивающий активизацию расстила, МТФ-55. МТФ-55 – это самоходный комбайн с шириной захвата 4,8 м, включающий в себя гусеничный ход, пневмотранспортную систему, бункер, двигатель, трансмиссию, кабину и прицепленный сзади фрезер МТФ-12А. Сам комбайн состоит из 4 активных сопел, системы трубопроводов всасывающей и нагнетательной магистралей, двух циклонов и одного центробежного вентилятора [40].

В вопросах создания машин для пневматической уборки торфа ВНИИТП сотрудничал с ЦАГИ, Белорусским и Калининским политехническими институтами, Управлением торфяной промышленности Латвии, и позже — с фирмой «Турверуукки» и исследовательским центром VTT в Финляндии.

В результате исследований и производственного опыта были созданы две прицепные пневматические уборочные машины УФПП-1 (рисунок 1.9) и УПП-2 (рисунок 1.10).



Рисунок 1.9 – Прицепная пневмоуборочная машина УФПП-1



Рисунок 1.10 – Прицепная пневмоуборочная машина УПП-2

Пневматическая машина УФПП-1, прицепная к трактору ДТ-75Б, предназначена для уборки фрезерного торфа на топливо, или торфяную подстилку. Пневматическая машина состоит из трех сопел, воздухопроводов, циклона, вентиляторного агрегата. Машина имеет колесный ход и балансирную подвеску. На раме машины установлен бункер с подъемным дном и разгрузочной крышкой, являющейся стенкой бункера.

Простота конструкции машин УФПП-1 позволила в 1998 году изготовить серию в количестве шести штук в цехе торфопредприятия «Дмитрово-Черкасское» Тверской области. Но в связи с развалом торфяной промышленности все дальнейшие попытки наладить их производство не увенчались успехом, тогда как специалистами в Канаде и Финляндии за последующие годы были созданы несколько образцов пневмоуборочных машин.

До 1970-х годов пневматические машины выпускались в различных модификациях и усовершенствованию подвергались лишь отдельные узлы, а не машины в целом.

Советские машины обладали рядом недостатков, которые, в свою очередь, послужили причиной для фактического прекращения использования и эксплуатации их после 1970-х годов. К таким недостаткам относились черный металл, из которого создавались машины, и множество элементов, делающих конструкцию машины громоздкой и тяжелой.

Во время работы из-за трения торфяной крошки о внутренние стенки желобов возникало статическое электричество, вследствие которого иногда происходили самовозгорания, и, даже взрывы подобных машин. А появление гироскопического момента от вращения рабочего колеса вентилятора при поворотах машины вело к потере устойчивости машины.

На рубеже 1990–2000-х годов использование пневматического метода уборки фрезерного торфа возобновилось спустя почти 30 лет. Достоинства пневматического метода уборки фрезерного торфа в удобстве и скорости не оставили в стороне инженеров и проектировщиков. Благодаря новым

разработкам и технологиям они вдохнули новую жизнь в пневмоуборочные машины [40–42].

Лидером по выпуску современных пневматических машин для уборки фрезерного торфа является канадская компания «Premier Tech Ltd». На сегодняшний день она изготавливает два вида пневмоуборочных машин: самоходный комбайн SAM-404 (рисунок 1.11) и прицепную машину SA-200 (рисунок 1.12) [40].

Сопла канадских машин расположены вертикально к торфяной залежи, что приводит к снижению сопротивления потоку торфовоздушной смеси и повышению компактности. Однако, такая форма сопла ухудшает его вписываемость в рельеф поверхности, тем самым повышая требования к подготовке и содержанию полей добычи в процессе эксплуатации. Торфяная залежь обладает изменчивыми деформационными свойствами по глубине и площади поверхности, что приводит к затруднениям при сохранении ровной поверхности в течение всего сезона добычи.



Рисунок 1.11 – Самоходный пневмоуборочный комбайн для фрезерного торфа фирмы «Premier Tech Ltd» SAM-404



Рисунок 1.12 – Прицепная пневмоуборочная машина для фрезерного торфа фирмы «Premier Tech Ltd» SA-200

Весьма близки по конструкции к SA-200 пневмоуборочные машины КТТ-2 (рисунок 1.13) [42] и МПТУ-30 (рисунок 1.14) [43], выпускаемые Эстонской фирмой «KRUVIKS OU» и предприятием Беларуси «Энергоремонт» – филиалом РУП «Могилевэнерго».



Рисунок 1.13 – Пневмоуборочная машина КТТ-2 компании «KRUVIKS OU»



Рисунок 1.14 – Пневмоуборочная машина МПТУ-30 компании РУП «Могилевэнерго»

Характерной особенностью всех вышеперечисленных современных пневматических торфоуборочных машин является изготовление бункера и воздухопроводов из высоколегированной (нержавеющей) стали и алюминиевых сплавов, в результате чего значительно уменьшается статическое электричество, возникающего во время трения торфяной крошки о стенки воздухопроводов и бункера.

Эстонские и украинские специалисты производят машину ЛК-40DF, существенно отличающуюся своей конструкцией от вышеперечисленных наличием двухступенчатой системы очистки торфовоздушной смеси (рисунок 1.15) [43].



Рисунок 1.15 – Пневмоуборочный комбайн JIK-40DF

Машина JIK-40DF высокоэффективна, создает минимальные выбросы торфяной пыли и пригодна для работы на пересечённой местности для производства качественного фрезерного торфа. Благодаря выступающей вбок конструкции дна, машина особенно подходит для выгрузки убранного торфа в штабели. Машину можно оснастить дополнительным приводом на основе фрикционного ролика или колеса, уплотняющего поверхность штабеля. Осуществляемое вторичными циклонами удаление пыли очень эффективно и намного снижает выбросы торфяной пыли в атмосферу. Пыль собирается в контейнер, находящийся под циклонами, откуда ее можно высыпать перед штабелем. Контейнер можно заменить направляющими пыль конструкциями, распыляющими отделяемую пыль по поверхности всего торфяного поля. Для снижения веса контейнер и циклоны изготавливаются из алюминиевых сплавов [43].

Следует отметить, что оснащение машин второй ступенью очистки торфовоздушной смеси дополнительными циклонами-отделителями имеет не только положительную, но и отрицательную стороны. Так, машины приобретают повышенную металлоемкость, увеличенное сопротивление в пневматической системе, а также возросший расход энергии. Полностью же устранить пыление возможно лишь в стационарных условиях.

Современные пневмоуборочные машины доказали свою экономическую эффективность в условиях применения на небольших предприятиях площадью до 70 Га, поскольку номенклатура требуемой техники сокращается до одного наименования: пневмоуборочная машина, совмещенная с пассивным фрезером, которая за один проход выполняет две операции. Ввиду малой глубины фрезерования, операция ворошения, как правило, не нужна, поскольку фрезерная крошка без него успевает высохнуть в течение одного дня. Отпадает также и необходимость операции валкования.

Однако, работы, в т. ч. конструкторские и исследовательские по обоснованию конструкций и созданию торфяных пневмоуборочных машин с рециркуляцией потока воздуха (для активизации расстила фрезерной крошки) в настоящее время не продолжают [44].

1.4. Морфологический и параметрический анализ машин для пневматической уборки торфа

Важнейшими характеристиками пневмоуборочных машин являются скорость всасывания и витания частиц, скорость торфовоздушного потока в циклоне. Все они являются зависимыми от влаги и размеров торфяных частиц.

На основе проведенного обзора можно выделить следующие конструктивные варианты исполнения пневмоуборочных машин (табл. 1.2).

Таблица 1.2. – Морфологическая карта вариантов конструкций пневматических машин для уборки фрезерного торфа

Параметр	Варианты исполнения								
	КПФ-6,4	ППФ-5	SA-200	МПУ-30	КТТ-2	ЛК-40DF	SAM-404	БПФ-3М	МТФ-55
Компоновочное решение	прицепная	прицепная	прицепная	прицепная	прицепная	прицепная	самоходная	самоходная	самоходная
Тип ходового устройства	гусеничное	гусеничное	колесное	колесное	колесное	колесное	колесное	гусеничное	гусеничное
Расположение сопел	наклонное	наклонное	вертикальное	вертикальное	наклонное	наклонное	вертикальное	наклонное	наклонное
Количество сопел	6	2	2	2	2	2	4	4	4
Активизация расстила	есть	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	есть
Вписываемость в рельеф	высокая	высокая	низкая	низкая	высокая	высокая	низкая	высокая	высокая
Сопротивление потоку	высокое	высокое	низкое	низкое	высокое	высокое	низкое	высокое	высокое
Двухступенчатое пылеудаление	нет	нет	нет	нет	нет	да	нет	нет	нет

По результатам проведенного анализа следует, что самые эффективные пневматические машины с наклонным расположением сопел, что обеспечивает лучшую вписываемость в рельеф залежи. На сегодняшний день используются современные пневматические машины, отличающиеся от своих предшественников более безопасной конструкцией и меньшими габаритами, позволяющие машине быть маневренней и устойчивей.

На основании технической характеристики существующих пневматических комбайнов и машин (таблица 1.3) построен параметрический ряд зависимости производительности машины от веса (рисунок 1.16).

Таблица 1.3. – *Параметрический ряд пневматических машин для уборки фрезерного торфа*

Машина	Вес G , кН	Производительность Q , га/ч
БПФ-3М	129,45	2,61
МТФ-55	124,5	2,05
КПФ-6,4	160,83	3,43
ППФ-3	58,15	1,79
ППФ-5	53,15	2,23
ПУМ-3Э	85,54	1,06
ПУМ-2	76,91	0,98
SA-200	38,59	2,74
SAM-404	66,73	3,15
КТТ-2	38,59	2,74
МПТУ-30	39,23	2,74
ЛК-40DF	78,45	1,8

Получено аппроксимирующее уравнение зависимости производительности от веса машин:

$$Q = 0,002G + 2,092 . \quad (1.16)$$

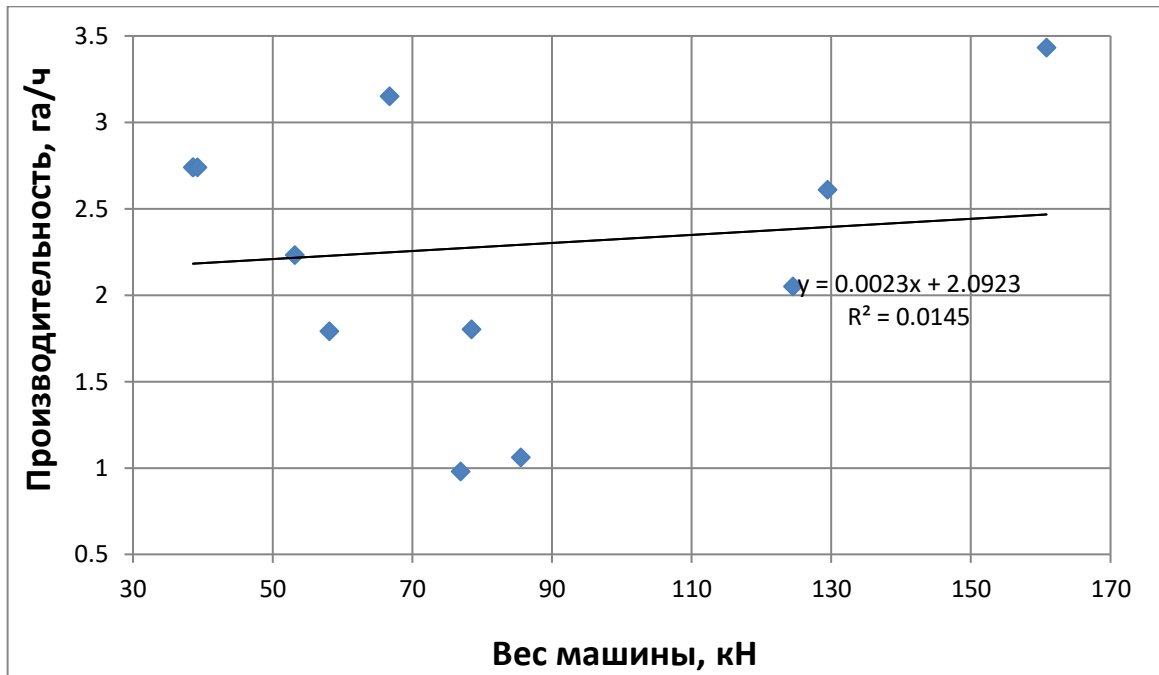


Рисунок 1.16 – График зависимости производительности пневмоуборочных машин от веса

Следует отметить, что наилучшей эффективностью по соотношению «вес – производительность» обладает современная самоходная машина SAM-404. В то же время, наибольшая концентрация опытных точек наблюдается в зоне производительности 1,79–2,23 га/ч при весе 53,15–78,45 кН. В данный интервал включены ранее описанные пневматические машины прицепного типа. Поэтому можно сделать вывод о рациональности конструкций машин, параметры которых вписываются именно в этот интервал.

1.5. Исследование парусности торфяных частиц

В основе исследования парусности торфяных частиц лежит определение скорости витания частиц. Скорость витания – скорость восходящего потока, при которой частица, помещенная в этот поток, находится во взвешенном состоянии, т.е. витает. Скорость можно рассчитать теоретически и определить экспериментально.

Частица, помещенная в восходящий поток или падающая в неподвижной среде, будет находиться под действием силы тяжести F_T и силы давления P потока воздуха. При равенстве этих сил в восходящем воздушном потоке частица не будет иметь поступательного движения ($v_M=0$), она колеблется (парит). В неподвижной среде частица будет равномерно падать. При витании можно записать, что:

$$P = F_T. \quad (1.17)$$

При больших числах Рейнольдса ($Re \geq 2 \cdot 10^4 - 10^5$), характеризующих турбулентное обтекание частиц, действует квадратичный закон сопротивления:

$$P = cF \frac{v^2}{2} \gamma_B, \quad (1.18)$$

где $c = 0,5 - 1$ – безразмерный коэффициент, F – площадь поверхности тела, m^2 ; v – скорость потока воздуха, m/c ; γ_B – плотность воздуха, kg/m^3 .

Тогда при витании (или падении в неподвижной среде) частиц шаровой формы:

$$q \frac{\pi d^3}{6} \gamma_{\text{ч}} = c \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{v_s^2}{2} \gamma_B, \quad (1.19)$$

где d – диаметр частицы, m ; $\gamma_{\text{ч}}$ – плотность частицы, kg/m^3 ; v_s – скорость витания частицы, m/c .

Откуда выразим скорость витания частицы:

$$v_s = \sqrt{\frac{4gd\gamma_{\text{ч}}}{3c\gamma_B}}. \quad (1.20)$$

Так как скорость витания зависит от плотности и размеров частиц, то приближенно ее можно определить[3]:

$$v_s = 4,7\sqrt{d\gamma_{\text{ч}}}. \quad (1.21)$$

Для частиц фрезерного торфа, отличающимся по своей форме от шаровой, в уравнении (1.20) вводя эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}$ частиц и поправку за форму частиц, которая определяется коэффициентом формы, представляющий отношение коэффициентов сопротивления данной частицы и эквивалентного шара.

Экспериментальное определение скорости витания заключается в проведении опыта в аэродинамической трубе. Аэродинамическая труба представляет собой коническую трубу с центральным углом около 8° длиной 1,5-2,5 м. через трубу пропускается воздушный поток, в который помещают частички испытуемого материала [38].

Н.В. Кислов исследовал скорость витания частиц переработанного фрезерного и гранулированного торфа в зависимости от их физико-механических свойств. Он проводил опыты с четырьмя видами верхового торфа различной степени разложения ($R = 10 \div 30 \%$) и одним видом низинного при $R = 45 \%$. Степень механической переработки (λ_0) образцов верхового и низинного торфа, найденная по методу Ф.А. Опейко [45, 46], составила, соответственно, 659 и 500 единиц. При определении скоростей витания влага четырех образцов каждого вида торфа принималась в пределах 23,2–48,5 %. Для них определялись зольность, насыпной объемный вес и фракционный состав, а также эквивалентный по объему диаметр и объемный вес частиц каждой фракции. Полученная зависимость объемного веса частиц γ_T верхового торфа со степенью разложения 10 % от среднего диаметра фракции d и влаги w изображена на рисунке 1.17.

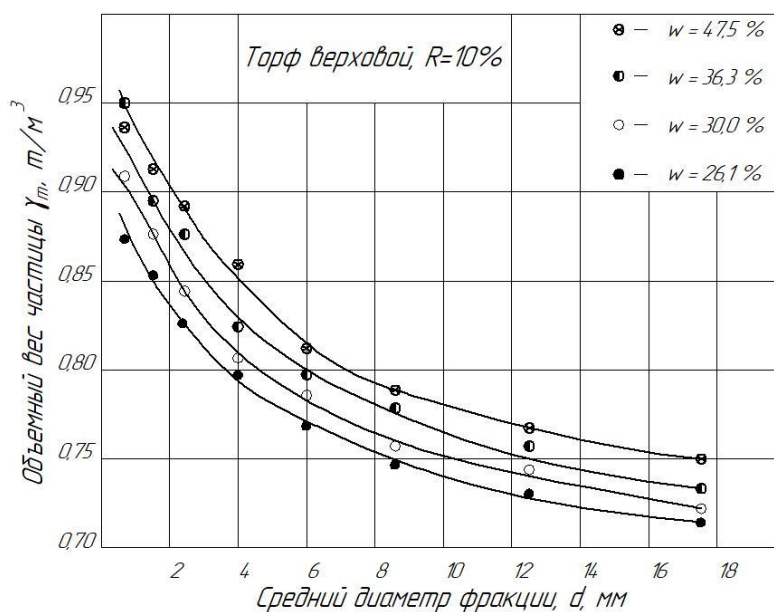


Рисунок 1.17 – Зависимость объемного веса частиц γ_T верхового торфа со степенью разложения $R = 10 \%$ от среднего диаметра фракции d и влаги w

Исследования проводились на экспериментальной установке, представляющей собой вертикальную трубу всасывающего типа (рисунок 1.18). Выявлено, что значения объемного веса исследуемых частиц больше единицы и не всегда зависит от увеличения влаги частиц. Это явление объясняется разными ботаническим составом и степенью разложения у различных фракций.

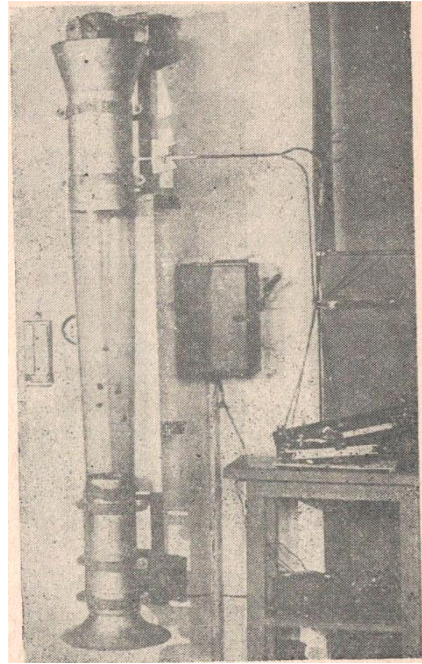


Рисунок 1.18 – Установка для исследования скоростей витания торфяных частиц

Результаты исследований по определению скоростей витания приводились к нормальным атмосферным условиям (рисунок 1.19), в связи с этим осуществлялся постоянный контроль температуры и барометрического давления воздуха.

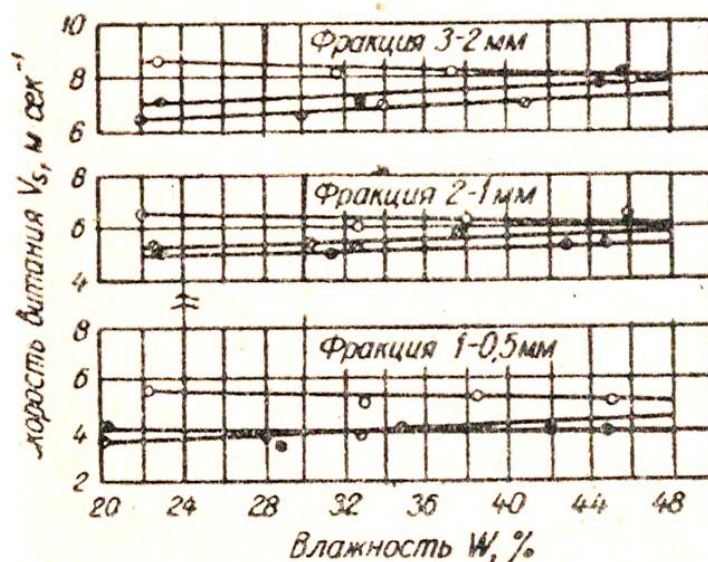


Рисунок 1.19 – Зависимость скорости витания торфяных частиц от их влаги:

○ – торф низинный, $R = 45\%$; ● – торф верховой, $R = 35\%$;

○ – торф верховой, $R = 10\%$

Исследование показало, что скорость витания частиц низинного переработанного торфа размером менее 3 мм с увеличением влаги падает. Это связано с тем, что объемный вес этих частиц превышает единицу и с увеличением влажности несколько уменьшается [44, 46].

1.6. Исследование аэродинамических характеристик сыпучих материалов при транспортировании и разделении горных пород

В настоящее время ведутся исследования в области изучения физико-механических свойств различных сыпучих материалов. Изучением данных свойств занимались А.И. Афанасьев, В.Я. Потапов, Я.К. Абрамов, В.М. Веселов и др. Их исследования можно разделить на две категории: изучение парусности и механических свойств частиц.

К первой категории можно отнести работы В.Я. Потапова и П.М. Анохина.

Областью исследования В.Я. Потапова является изучение аэродинамических характеристик частиц, обладающих парусностью с целью создания и использования пневмотранспортных систем, активных фрикционных сепараторов, аппаратов для разделения горных пород [47–54].

В работах П.М. Анохина исследована работа аэродинамически активных фрикционных сепараторов для разделения в воздушной среде частиц на примере горных пород, в частности волокон антофиллит асбеста. Одним из главных признаков при разделении материалов в воздушном потоке, как отмечает автор, является скорость витания асбестового волокна и породы [47–56]. Исследование проводилось с недеформированными волокнами антофиллит асбеста плотностью $3,0 \text{ кг/см}^3$ и хризотил-асбеста плотностью $2,45 \text{ кг/см}^3$ в вертикальном воздушном потоке.

В работах В.Я. Потапова и др. разработана математическая модель движения при разделении частиц в барабанно-полочном фрикционном сепараторе [47], приведены результаты изучения парусности частиц при разделении и пневматическом транспортировании асбестовых руд [51, 54], разработаны аэродинамически активные фрикционные сепараторы [58, 59].

Исследованием определено, что характеристикой формы частицы является коэффициент воздушного сопротивления, зависящий от параметров Рейнольдса; асбестовое волокно ориентируется по отношению к потоку своим наибольшим сечением, скорость витания волокна следует определять по размеру диаметра.

При нестационарных расчетах необходимо учитывать инерционные силы движения воздуха, когда процесс протекает в течение нескольких секунд, или в процессе участвуют большие массы воздуха. В этом случае учет инерционных сил уменьшает возникновение значительных погрешностей.

Ко второй категории можно отнести работы В.А. Копачева, В.М. Веселова, Я.К. Абрамова и др.

В.А. Копачев исследовал методы и решения для повышения эффективности комплексов шахтных вентиляционных установок [58–63]. Исследователями было установлено, что современные методы и расчеты позволяют моделировать аэрологические процессы, происходящие в вентиляционных сетях любой сложности. Разделяют четыре задачи рудничной аэрологии:

- расчет стационарного воздухораспределения;
- расчет нестационарного воздухораспределения;
- расчет газораспределения (газопереноса);
- расчет теплораспределения (теплопереноса).

Отмечено, что если расчет стационарного воздухораспределения широко применяется и является основным инструментом проектирования и управления вентиляционными сетями, то остальные задачи аэрологии являются более специфичными [58–61]. Для расчета стационарного воздухораспределения применяется Метод контурных расчетов (МКР).

В.М. Веселов, Я.К. Абрамов и др. в своих работах исследовали транспортирование сыпучих материалов в вакуумно-пневматическом транспорте с высокой массовой концентрацией. Сущностью исследования являлось увеличение протяженности транспортирования сыпучего материала на горизонтальных и вертикальных участках системы, путем подачи материала из зоны атмосферного давления, в зону находящейся под вакуумом [64–66].

1.7. Выводы по главе, цель работы и задачи исследования

Анализ работ, связанных с механизацией пневматической уборки торфа показал следующее.

1. В основе работы пневмоуборочных машин лежит принцип всасывания благодаря наличию в бункере сильного разрежения, создаваемого центробежным вентилятором.

2. Весь путь движения частиц торфа в пневмоуборочной машине условно можно разделить на три части: всасывание, обеспечиваемое конструкцией сопла и скоростью всасывания; вертикальное и горизонтальное транспортирование в воздушном потоке, обеспечиваемое скоростью витания торфяных частиц; разделение торфовоздушной смеси, обеспечиваемое функционированием циклонного устройства (или простейшего отделителя) и скоростью потока на входе в него.

3. Преобладающее количество научных исследований касается определения скорости витания торфяных частиц в вертикальных воздухопроводах пневмоуборочных машин. По праву данный участок считается одним из наиболее узких и уязвимых мест, как в теоретическом, так и в практическом плане.

4. Сведения о работе всасывающей зоны пневмоуборочных машин представлены достаточно скудно. Несмотря на то, что есть исследования, связанные с определением давления в разных точках сопла при работе машины, вопрос о рациональной геометрической ориентации сопла по отношению к расстилу торфяной крошки остается открытым.

Целью работы является обоснование рациональных параметров установки всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины, способствующих повышению эффективности уборки торфа.

В связи с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- определить составляющие равнодействующей силы, под влиянием которых частица торфа находится в зоне всасывания;
- проанализировать условия и механизм появления подъемной силы, действующей на частицу торфа в зоне всасывания;
- получить аналитические зависимости минимальной скорости воздушного потока, необходимой для процесса всасывания от параметров торфяной фрезерной крошки;

- провести экспериментальные исследования работы всасывающего сопла пневмоуборочной машины в полевых условиях с целью определения скорости всасывания на входе в сопло;
- разработать и создать лабораторную установку для исследования работы модели всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины;
- провести лабораторные исследования по оценке скорости всасывания торфяных частиц соплом в различных зонах всасывающего факела;
- провести лабораторные исследования по оценке эффективности всасывания торфяных частиц соплом с различными параметрами;
- разработать конструкцию насадка для всасывающего сопла;
- обосновать рациональные параметры установки всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ВСАСЫВАНИЯ ТОРФЯНОЙ КРОШКИ СОПЛАМИ ПНЕВМОУБОРОЧНЫХ МАШИН

2.1. Скорости воздушного потока на различных участках торфяной пневмоуборочной машины

Любая торфяная пневмоуборочная машина имеет три характерных участка движения торфовоздушного потока: всасывания, транспортирования (вертикального и горизонтального) и разделения.

Всасывание фрезерной крошки производится соплами в основном без принудительной активизации расстила, и обеспечивается разностью вакуумметрического давления, создаваемого вентилятором в пневмосистеме машины и атмосферного давления окружающей среды [67, 68]. Благодаря этому воздух засасывается в сопло и увлекает за собой частицы торфа, расположенные в зоне действия сопла (всасывающего факела). На частицы торфа при этом действуют как горизонтально, так и вертикально направленные силы [69, 70], от соотношения величин которых и зависит возможность и интенсивность всасывания. Воздушный поток, образуемый соплом, создает силу давления на частицы торфа, которая должна, в свою очередь, обеспечивать создание подъемной силы и преодоление сил веса, касательной силы трения и др. В противном случае всасывание происходить не будет. Скорость воздушного потока по мере удаления от сопла постепенно уменьшается, разделяя всю область всасывающего факела (потока воздуха, который поступает в сопло пневмосистемы) на две зоны – активного и пассивного действия (рисунок 2.1).

Исследованиями Л.О. Горцакаляна и др. [67, 68, 70 и др.] определена необходимая скорость воздушного потока на входе в сопло (25–35 м/с). В активной зоне всасывающего факела скорость воздушного потока должна быть достаточна для отрыва частицы с места, создания подъемной силы. В пассивной зоне, ввиду гораздо меньшей скорости воздушного потока, не

обеспечивается создание подъемной силы. И хотя материал может транспортироваться во взвешенном состоянии или волоком, всасывания не происходит. Начало пассивной зоны обеспечено, как правило, скоростью воздушного потока около 12–15 м/с [71].

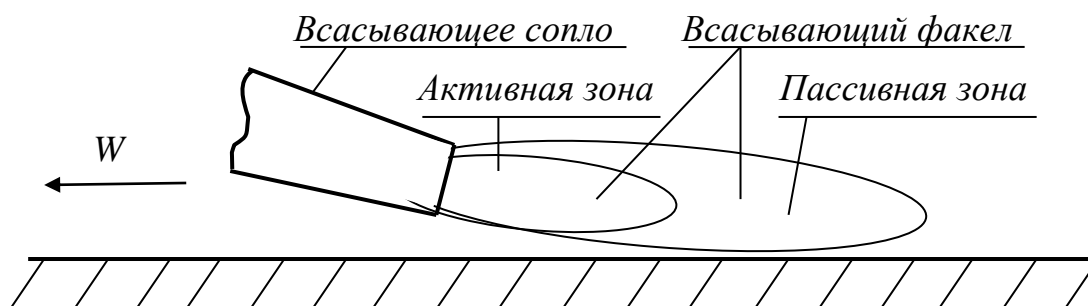


Рисунок 2.1 – Работа всасывающего сопла и формирование активной и пассивной зоны всасывающего факела

После всасывающих сопел, частицы торфа в пневмоуборочных машинах проходят участки вертикального и горизонтального транспортирования, а также разделения торфовоздушной смеси на торф и воздух. Для участков транспортирования крайне важным параметром является скорость витания v_s – скорость восходящего потока, при которой частица находится в состоянии невесомости, т. е. витает. Именно скорость витания является главной аэродинамической характеристикой торфяных (и не только торфяных) частиц. Скорости витания торфяных частиц, в зависимости от их размеров, плотности и влаги определяются экспериментально, например, на установке, описанной в работах [72, 73]. При проектировании вертикального участка скорость транспортирования частиц принимается на 20–50 % больше скорости витания наиболее крупных частиц, называемой расчетной скоростью витания, а горизонтального участка – в два – три раза больше расчетной скорости витания [74]. Это объясняется тем, что на вертикальном участке частицы перемещаются во взвешенном состоянии, а в горизонтальном – в основном волоком. При транспортировании волоком присутствуют силы трения между частицами и

пневможелобом и силы сцепления между частицами. Исключением является случай расчета для материала, состоящего из мельчайших частиц пыли. Скорость витания для частиц пыли ничтожно мала, но частицы пыли могут слипаться друг с другом в результате действия сил электростатического притяжения между ними, что приводит к образованию сплошного потока частиц, обладающего свойствами уже не аэросмеси, а однородной жидкости. В этом случае скорость витания пыли принимается равной 4–8 м/с [75, 76].

При проектировании участка разделения торфовоздушной смеси, скорость потока на входе в циклон принимается 15–22 м/с. На машинах КТТ-2 и МПТУ-30 участок разделения торфяной крошки и воздуха представляет собой не циклон, а простейший отделитель, функционирующий за счет касательного ввода пневмопроводов в корпус и многократного увеличения живого сечения потока, благодаря чему, частицы с резко снизившимися скоростями движения оседают на дно бункера.

Учитывая, что проблемы при уборке переходного и низинного торфов (имеющих большую плотность, чем верховой) возникают на стадии всасывания, было принято решение исследовать и проанализировать именно всасывающий участок пневмоуборочной машины.

2.2. Спектр всасывания и сопла торфяных пневмоуборочных машин

Опытным путем возможно найти направление и величину скорости движения воздушного потока в любой точке пространства перед соплом. Это дает возможность определить положение во всасывающем факеле поверхностей равных скоростей. Любая поверхность равных скоростей – геометрическое место точек, в каждой из которых скорость воздуха имеет одно и то же значение. В каждой точке поверхности скорость направлена перпендикулярно к поверхности, а направление скорости является касательной к направлению линии тока [77]. В любой плоскости поверхности равных скоростей окажутся представленными линиями равных скоростей,

называемыми изотаксами, образующими вместе с линиями тока в вертикальной плоскости спектр всасывания (рисунок 2.2).

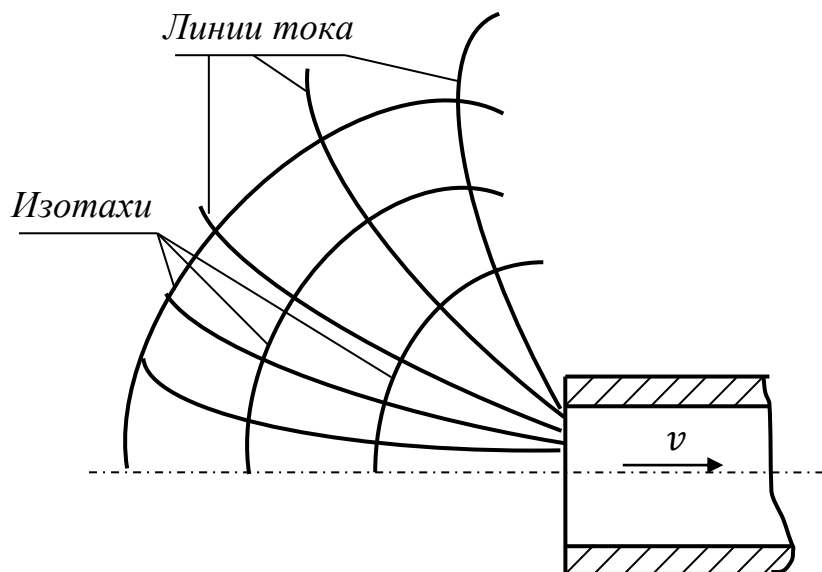


Рисунок 2.2 – Сектор спектра всасывания

В горизонтальной плоскости имеет место ограничение спектра всасывания с нижней стороны подстилающей поверхностью торфяной залежи. Линии тока и изотакси, размещенные в горизонтальной плоскости характеризуют факел всасывания.

В работе [78] была получена зависимость, определяющая величину осевой скорости потока v [м/с] от расстояния X [м] от точки до входной щели сопла:

$$v = \frac{v_0}{1 + \frac{X^{1,4}}{K_n S^{0,7}}}, \quad (2.1)$$

где v_0 – осевая скорость в плоскости входной щели сопла, м/с; K_n – коэффициент, зависящий от формы входной щели сопла; S – площадь входной щели, м².

Для наиболее распространенной формы входной щели сопла в виде прямоугольника при отношении сторон 1:10 $K_n = 0,05$; при отношении сторон 1:80 $K_n = 0,03$ [79].

Прежде чем попасть в сопло весь объем воздуха последовательно проходит все поверхности равных скоростей.

Сопла, собирающие торф только в активной зоне всасывающего факела принято считать пассивными, а сопла, собирающие торф как в активной, так и пассивной зонах, принято называть активными. Для возможности работы сопла в пассивной зоне всасывающего факела торфяная крошка должна быть предварительно «активизирована» (переведена во взвешенное состояние) с помощью механических щеток или путем подачи направленной струи отработавшего воздуха от вентилятора в зону всасывания (рециркуляции воздуха) и др.

В активных соплах энергия воздушного потока расходуется только на сообщение частицам материала необходимой скорости и преодоление аэродинамических сопротивлений, возникающих при движении аэросмеси в соплах. В пассивных соплах, кроме вышеназванных потерь, часть энергии затрачивается еще и на отрыв частиц материала от подстилающей поверхности и преодоление сил инерции покоя.

Наибольшее распространение получили в настоящее время пассивные сопла, что объясняется более высокой надежностью машин из-за простоты конструкции.

Передвижение пассивного сопла с постоянной скоростью и увеличение скорости воздушного потока на входе в сопло v_0 приводит к увеличению подачи материала в пневмосистему. Количество подаваемого материала увеличивается относительно скорости воздушного потока в большую сторону и это вызывает увеличение концентрации аэросмеси.

Геометрические параметры сопла выбираются с таким расчетом, чтобы обеспечить необходимую производительность машины, снизить расход воздуха и сопротивления движению аэросмеси внутри сопла.

Входная щель сопла (рисунок 2.3) имеющего, как правило, прямоугольную форму, характеризуется высотой и шириной. Высота сопла a , отвечающая за работоспособность (отсутствие забиваний на входе)

находится в пределах 40–80 мм, а ширина b , отвечающая одновременно и за вписываемость в рельеф и за ширину захвата машины – в пределах 0,8–2,0 м. Большая высота входной щели сопла приводит к засасыванию излишнего воздуха, не принимающего участия в подъеме частиц торфа с поверхности залежи. Меньшая высота входной щели приводит к возрастанию вероятности забивания сопла древесной щепой и торфяными волокнами. При бóльшей ширине входной щели ухудшается проходимость соплом неровной поверхности залежи. В зависимости от применяемого трубопровода в пневмосистеме, выходное отверстие сопла имеет квадратную или круглую форму. Размеры выходного отверстия проектируются с учетом того, что скорость воздуха в выходном отверстии v_{c_2} определяется как скорость транспортирования в вертикальном трубопроводе.

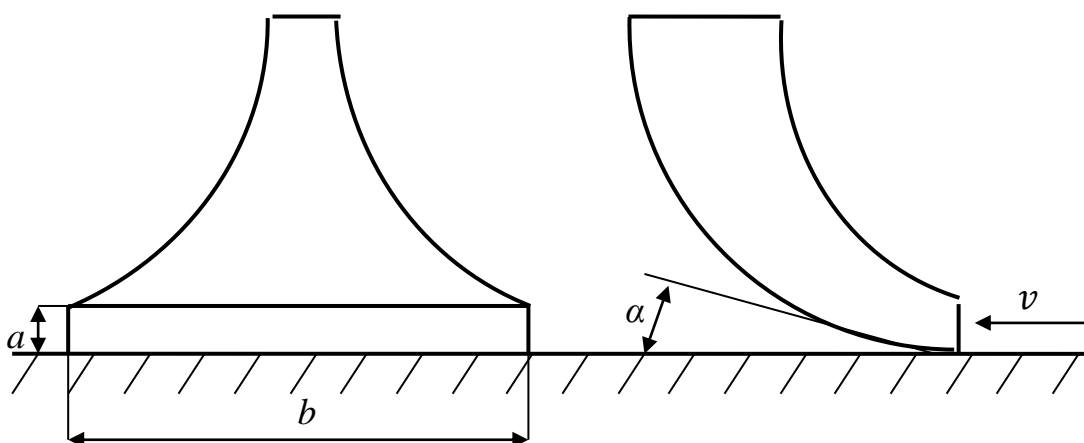


Рисунок 2.3 – Форма всасывающего сопла

Для плавности входа потока в сопло кромки входной щели сопла делаются с закруглением. Закругление выполняется либо по кривой, называемой лемниской, либо по дуге окружности. Начиная от входной щели, верхнюю и нижнюю стенки сопла делают расходящимися. Во избежание вихреобразований вследствие отрыва воздушной струи от верхней стенки сопла центральный угол между верхней и нижней стенкой не

превышает 8° . Угол установки сопла α следует принимать не более угла внутреннего трения транспортируемого материала [77, 79].

Радиус закругления сопла в пределах отвода вычисляется по формуле, предложенной в работе [80] из условия наименьшего количества ударов частиц о стенки:

$$R = \frac{d \cdot \cos \frac{\varphi}{2x}}{1 - \cos \frac{\varphi}{2x}}, \quad (2.2)$$

где d – ширина сопла в среднем сечении его в пределах отвода; x – число ударов частиц о наружную стенку отвода; φ – угол, охватываемый закруглением. При $\varphi = 45\text{--}90^\circ$ $x = 2$. При $\varphi = 0\text{--}45^\circ$ $x = 1$.

Соединение сопла с трубопроводом осуществляется с помощью армированной резины, прорезиненной ткани и т. д. Это обеспечивает гибкость соединения, которая необходима для защиты сопла от ударов при движении и хорошего вписывания в рельеф поверхности торфяных карт.

2.3. Силы, действующие на частицу торфа в процессе всасывания

Попытки силового анализа воздействия потока на частицы в воздушной и жидкостной среде предпринимались многими учеными. В этом направлении следует отметить работы [69, 70, 81, 82, 83 и др.]. Однако фрезерный торф имеет свою ярко выраженную специфику, поэтому данная тема здесь поднимается вновь.

Для упрощения рассмотрим неподвижную частицу торфа шарообразной формы, находящуюся в зоне действия всасывающего факела. На частицу в таком положении оказывает влияние *сила тяжести, сила адгезии, сила сцепления, вызванная воздействием на частицу окружающих частиц и подстилающей поверхности, сила трения, сила лобового давления, вызванная воздействием на частицу воздушного потока, подъемная сила, вызывающая отрыв частицы от подстилающей поверхности.*

Начало координат, совместим с центром неподвижной частицы. Ось OX направим в сторону движения воздушного потока и последующего поступательного движения частицы. Ось OZ направим вверх в сторону последующего отрыва частицы от подстилающей поверхности торфяной залежи (рисунок 2.4).

Сила тяжести является неотделимой от частицы и действует на нее независимо от присутствия (отсутствия) всасывающего воздушного потока. Для частиц шарообразной формы сила тяжести:

$$F_T = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g, \quad (2.3)$$

где m – масса частицы, кг; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; r – радиус частицы, м; ρ_T – плотность торфяной частицы, кг/м³.

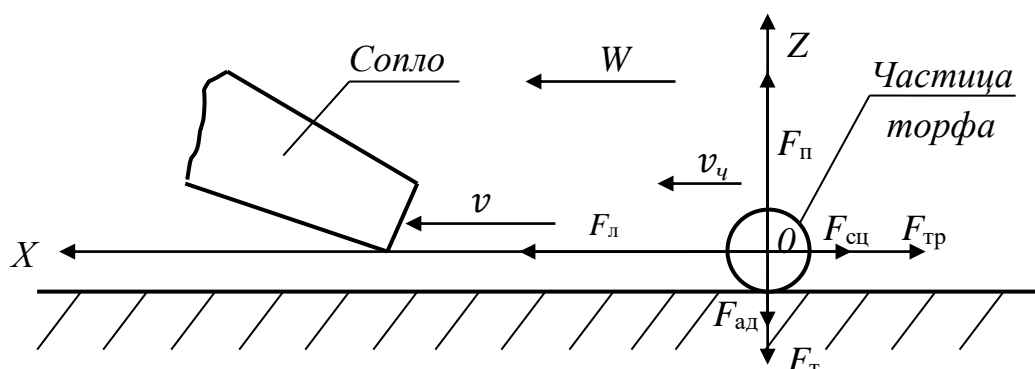


Рисунок 2.4 – Расчетная схема к анализу сил, действующих на частицу торфа в момент ее нахождения в зоне всасывающего факела

Сила адгезии в работах [69, 83] подсчитывается так:

$$F_{ад} = \frac{h\omega}{8\pi z^2} r, \quad (2.4)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ – постоянная Планка; ω – угловая скорость вращения частицы, с⁻¹; z – расстояние от частицы до ограничивающей поверхности, м.

В работе [70] такая сила вообще не учитывается. Природа силы адгезии заключается в возникновении вокруг частицы некоего поверхностного слоя (пленки) и последующем межмолекулярном взаимодействии в поверхностном слое [84]. По сути, адгезия – есть прилипание. Такому

случаю, как нельзя лучше бы соответствовали частицы торфа непосредственно во влажной торфяной залежи. Однако, высохшие частицы фрезерного торфа, можно лишь с очень большой натяжкой считать покрытыми поверхностным слоем.

Теория Б.В. Дерягина основана на предположении, что сила адгезии является функцией толщины зазора h между частицами или между частицей и подстилающей поверхностью. Для случая взаимодействия твердых частиц между собой формула для силы адгезии имеет вид [85]:

$$F_{\text{адч}} = 2\pi \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \cdot (2\sigma_1 - \sigma_2), \quad (2.5)$$

где r_1 и r_2 – радиусы шарообразных частиц, м (в нашем случае $r = r_1 = r_2$), σ_1 и σ_2 – поверхностное натяжение на границе фаз 1 и 2 (в нашем случае $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \approx 0,08$ Н/м [85]).

Подставив значения r и σ в выражение (2.5) получим:

$$F_{\text{адч}} = \pi r \sigma. \quad (2.6)$$

Для случая взаимодействия твердых частиц с плоской подстилающей поверхностью сила адгезии имеет вид [85]:

$$F_{\text{адп}} = 4\pi r \sigma. \quad (2.7)$$

Суммарная сила адгезии будет представлять собой:

$$F_{\text{ад}} = F_{\text{адч}} + F_{\text{адп}} = 5\pi r \sigma. \quad (2.8)$$

Однако, с учетом того, что подстилающая поверхность также представляет собой совокупность множества частиц, адгезию с подстилающей поверхностью можно не учитывать и тогда:

$$F_{\text{ад}} = \pi r \sigma. \quad (2.9)$$

По нашему мнению, более глубоко отражает смысл сил сопротивления, возникающих между частицами и подстилающей поверхностью понятие «сцепления». Причем речь здесь идет не о «структурном» сцеплении, которое присутствует при сдвигающих напряжениях в монолите торфа, а о «восстанавливаемом» сцеплении, вызванном шероховатостями поверхностей соприкасающихся частиц торфа [37].

В таком случае, *сила сцепления*, вызванная воздействием на частицу окружающих частиц и подстилающей поверхности, может быть найдена по формуле:

$$F_{\text{сц}} = cS_{\text{сц}}, \quad (2.10)$$

где c – сцепление, Па; $S_{\text{сц}}$ – площадь сцепления ($S_{\text{сц}} \approx \frac{1}{2}4\pi r^2$), м².

Сцепление для торфа нарушенной структуры можно определить по формуле [86]:

$$c = 1,132 - \frac{0,08W_{\text{п}}}{100} + 0,0038 \left(\frac{W_{\text{п}}}{100} \right)^2, \quad (2.11)$$

где $W_{\text{п}}$ – полная влагоемкость, зависящая от вида торфяной залежи.

Так, например, для верхового торфа степень разложения $R = 5\text{--}10\%$ $W_{\text{п}} = 1\,500\%$, а для низинного с $R = 35\text{--}40\%$ $W_{\text{п}} = 700\%$ [87]. Для этих условий, сцепление c , определенное по зависимости (2.11) составляет, соответственно, 0,787 Па для верхового и 0,758 для низинного торфа.

Сила трения обусловлена трением покоя между частицей и окружающими поверхностями. Она может быть найдена по формуле:

$$F_{\text{тр}} = f(F_{\text{Т}} + F_{\text{ад}} - F_{\text{п}}), \quad (2.12)$$

где f – коэффициент трения частиц фрезерного торфа по подстилающей поверхности торфяной залежи; $F_{\text{Т}}$ – сила тяжести, Н; $F_{\text{п}}$ – подъемная сила, Н, возникающая при приближении сопла к частице, и фактически, не действующая на частицу при ее максимальном удалении от сопла на уровне длины оси активной зоны всасывающего факела.

Коэффициент трения, в свою очередь определяется, как тангенс угла внутреннего трения φ :

$$f = \text{tg}\varphi, \quad (2.13)$$

а угол внутреннего трения для фрезерного торфа составляет $32\text{--}45^\circ$ [88]. Соответственно, коэффициент трения находится в пределах 0,62–1,0.

Сила лобового давления вызвана прямым сопротивлением частицы при воздействии на нее потока жидкости или газа. Именно она является основной

активной силой, причиной страгивания частицы с места, и, в последующем, возникновения подъемной силы. Силу лобового давления можно определить по следующей зависимости [89]:

– для ламинарного режима обтекания твердого тела:

$$F_{\text{л}} = 6\pi\mu r(v - W); \quad (2.14)$$

– для турбулентного режима обтекания твердого тела:

$$F_{\text{лт}} = c_{\text{л}} \frac{\rho_{\text{в}}}{2} S_{\text{м}}(v - W)^2 \quad [90], \quad (2.15)$$

где $c_{\text{л}}$ – коэффициент лобового сопротивления частицы (для шарообразных частиц в потоке, характеризующемся числом Рейнольдса $Re = 10^4 - 4 \cdot 10^5$ $c_{\text{л}} = 0,44 - 0,1$ [91]); $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³; $S_{\text{м}}$ – площадь Миделя сечения частицы, м² (для шарообразной частицы радиусом r : $S_{\text{м}} = \pi r^2$); v – средняя скорость воздушного потока, действующего на частицу, м/с; μ – динамический коэффициент вязкости $\mu = \nu \rho_{\text{в}}$, Па·с; ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с; W – скорость поступательного движения торфяной пневмоуборочной машины ($W = 5 - 8$ км/ч = 1,4–2,2 м/с).

Динамический коэффициент вязкости для воздуха можно определить по формуле Сазерленда, отражающей зависимость вязкости газа от температуры вещества. С повышением температуры вязкость газа повышается в отличие от жидкостей [92]:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}, \quad (2.16)$$

где μ_0 – динамический коэффициент вязкости при нормальных условиях (н. у.), $\mu_0 = 18,27 \cdot 10^{-6}$ Па·с; T_0 – температура воздуха при н. у., $T_0 = 293,15$ К; T – температура воздуха, К; C – константа Сазерленда, $C = 120$ К.

Рассматривая шарообразную частицу торфа диаметром 25 мм и погодные условия, характерные для проведения пневматической уборки, отраженные в таблице 2.1 [93], можно по формулам (2.14) и (2.15) рассчитать значения силы лобового давления в зависимости от скорости воздушного потока для ламинарного и турбулентного режимов движения воздуха.

Таблица 2.1 – *Параметры состояния атмосферного воздуха*

Температура окружающего воздуха $t, ^\circ\text{C}$	20	25	30
Плотность воздуха $\rho, \text{кг/м}^3$	1,205	1,185	1,165
Кинематический коэффициент вязкости воздуха $\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$15,06 \cdot 10^{-6}$	$15,53 \cdot 10^{-6}$	$16 \cdot 10^{-6}$
Динамический коэффициент вязкости воздуха $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	$18,1 \cdot 10^{-6}$	$18,35 \cdot 10^{-6}$	$18,6 \cdot 10^{-6}$

Результат расчетов по зависимостям (2.14) и (2.15) показал, что сила лобового давления, создаваемая при турбулентном режиме при одних и тех же значениях скорости воздушного потока, в среднем на три порядка выше силы, создаваемой при ламинарном режиме движения. Следовательно, именно турбулентный режим движения воздушного потока необходимо создавать при пневматической уборке торфа. Вместе с тем, параметры вязкости воздуха влияют на лобовую силу давления незначительно.

Бесспорно, самой загадочной из всех вышеперечисленных сил, является *подъемная сила*. Если поток жидкости (газа) обтекает частицу как сверху, так и снизу, причем местная скорость линий тока снизу меньше, чем скорость сверху, по закону Бернулли меняется и давление: сверху частицы оно меньше, чем снизу. В результате возникает вертикальная аэродинамическая подъемная сила, причиной которой является градиент скорости по высоте [94].

Под действием градиента скорости силы трения отличаются по величине на верхней и нижней сторонах частицы, что порождает возникновение крутящего момента. Причем, чем крупнее частица, тем больше влияние градиента скорости на величину крутящего момента. Вращение частицы под действием крутящего момента, сопровождающееся столкновениями ее с другими частицами, происходит вокруг оси, нормальной к направлению потока, но, лежащей в горизонтальной плоскости. Неравномерная скорость обтекания и вращения частиц вызывает циркуляцию воздуха по контуру частицы. Если направление вращения

частицы и скорости потока совпадают, то скорость течения увеличивается, если противоположны – уменьшается. По этой причине давление под частицей возрастает, а над частицей – уменьшается. Отсюда и возникает вертикально вверх действующая подъемная сила (Магнуса), определить которую можно, например, воспользовавшись формулой Н.Е. Жуковского:

$$F_M = \rho_B \frac{\pi r^3}{2} v \frac{dv}{dz} \quad [69, 82]. \quad (2.17)$$

Запишем уравнение (2.17) для шарообразной частицы с учетом ее скорости и скорости воздушного потока и без учета силы адгезии, поскольку для (рисунок 2.5):

$$F_M = \frac{\pi}{\alpha} \rho_B r^2 v_B v_{ш}, \quad (2.18)$$

где α – угол направления воздушного потока, рад (при расположении частицы на расстоянии равном длине оси активной зоны всасывающего факела можно принять, что $\alpha \approx \pi$); $v_{ш}$ – скорость шарообразной частицы, м/с.

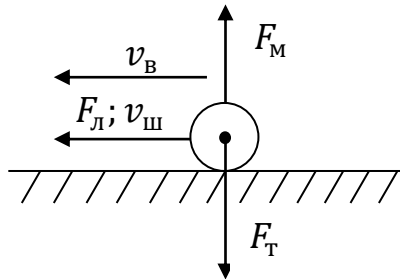


Рисунок 2.5 – Появление силы Магнуса

Для условия отрыва частицы от подстилающей поверхности необходимо выполнение условия:

$$F_M \geq F_T. \quad (2.19)$$

Используя выражение данные уравнений (2.18) и (2.3) уравнение (2.19) будет иметь вид:

$$\frac{\pi}{\alpha} \rho_B r^2 v_B v_{ш} \geq \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_T g. \quad (2.20)$$

Из уравнения (2.20) выразим скорость шарообразной частицы:

$$v_{\text{ш}} \geq \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{т}} g}{\frac{\pi}{\alpha} \rho_{\text{в}} r^2 v_{\text{в}}} = \frac{4\alpha r \rho_{\text{т}} g}{3\rho_{\text{в}} v_{\text{в}}}. \quad (2.21)$$

Приняв ориентировочно скорость воздушного потока $v_{\text{в}} \approx 10$ м/с, плотность торфа $\rho_{\text{т}} \approx 500$ кг/м³, $\alpha = \pi$, радиус частицы $r \approx 0,0125$ м и плотность воздуха $\rho_{\text{в}} \approx 1,205$ кг/м³, подсчитаем скорость движения шарообразной частицы:

$$v_{\text{ш}} \geq \frac{4\pi \cdot 0,0125 \cdot 500 \cdot 9,81}{3 \cdot 1,205 \cdot 10} \approx 21,3, \text{ м/с.}$$

Для появления силы Магнуса шарообразная частица, двигающаяся со скоростью $v_{\text{ш}}$ должна вращаться с частотой n :

$$n = \frac{v_{\text{ш}}}{2\pi r}, \quad (2.22)$$

$$n = \frac{21,3}{2\pi \cdot 0,0125} \approx 271 \text{ об/с,}$$

что невозможно в реальных условиях. Следовательно, и появление силы Магнуса также невозможно.

Природа подъемной силы, действующей на частицу, может быть вызвана образованием воздушных вихрей под и над частицей при ее обтекании потоком воздуха. При этом вихри подкидывают частицу с поверхности, заставляя ее оторваться от слоя и начать свое движение в потоке воздуха. Данный процесс весьма напоминает эффект ветровой эрозии почв [95, 96].

Рассмотрим взаимодействие воздушного потока с частицей. Для случая обтекания воздухом торфяной частицы, изображенной на рисунке 2.6, запишем уравнение Д. Бернулли для двух плоскостей 1-1 и 2-2:

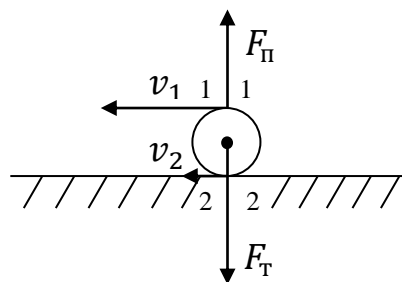


Рисунок 2.6. Силы, возникающие при обтекании частицы воздушным потоком

$$P_1 + \frac{\rho_B v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_B v_2^2}{2}, \quad (2.23)$$

где P_1 и P_2 – давление над и под частицей, Па; v_1 и v_2 – скорость воздушного потока над и под частицей, м/с.

Так как частица в неподвижном состоянии соприкасается с подстилающей поверхностью, то скорость воздушного потока под частицей $v_2 \approx 0$, тогда разница давлений составит:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho_B v_1^2}{2}, \quad (2.24)$$

Разница давлений порождает появление подъемной силы, пропорциональной площади Миделя.

$$F_{\Pi} = S_M \Delta P = S_M \frac{\rho_B v_1^2}{2}, \quad (2.25)$$

Для условия отрыва частицы от поверхности расстила должно выполняться условие: подъемная сила (2.25) равна или превышает силу тяжести (2.3):

$$\frac{F_{\Pi}}{F_T} = \frac{3\rho_B v_1^2}{4r\rho_T g} \geq 1, \quad (2.26)$$

откуда скорость воздушного потока необходимая для подъема частицы:

$$v_{\Pi} = v_1 \geq \sqrt{\frac{4r\rho_T g}{3\rho_B}}. \quad (2.27)$$

Принимая значения величин, входящих в формулу (2.27) аналогичными к формуле (2.21) получим:

$$v_{\Pi} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0125 \cdot 500 \cdot 9,81}{3 \cdot 1,205}} \approx 8,2 \text{ м/с}$$

Таким образом, изучив все силы, действующие на частицу торфа в момент ее статического положения в зоне действия всасывающего факела, справедлива расчетная схема (рисунок 2.4), в основе которой лежит принцип Даламбера [97].

2.4. Условия страгивания торфяной частицы с места и ее отрыва от подстилающей поверхности залежи

Дифференциальное уравнение движения частицы в горизонтальной плоскости (на разгонном участке) будет иметь вид:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{dv_x}{dt} = F_x, \quad (2.28)$$

где $\frac{d^2x}{dt^2}$ – проекция ускорения частицы на ось OX ; F_x – проекция результирующей силы на ось OX .

В вертикальной плоскости мы будем иметь следующее уравнение:

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = F_z, \quad (2.29)$$

где $\frac{d^2z}{dt^2}$ – проекция ускорения частицы на ось OZ ; F_z – проекция результирующей силы на ось OZ .

В горизонтальной плоскости перед страгиванием с места на частицу действует лобовая сила, сила трения и сила сцепления:

$$F_x = F_l - F_{\text{тр}} - F_{\text{сц}}. \quad (2.30)$$

В вертикальной плоскости перед началом отрыва от подстилающей поверхности на частицу действует сила тяжести, подъемная сила и сила адгезии:

$$F_z = F_{\Pi} - F_T - F_{\text{ад}}. \quad (2.31)$$

Однако, при движении частицы в момент отрыва ее от поверхности расстила, сила адгезии крайне мала, поэтому ею можно пренебречь, тогда на частицу будут действовать подъемная сила и сила тяжести:

$$F_z = F_{\Pi} - F_T. \quad (2.32)$$

Тогда условия, по которым возможно страгивание с места частицы в горизонтальной плоскости на расстоянии равном длине оси активной зоны всасывающего факела ($F_{\Pi} \approx 0$) и ее отрыв от подстилающей поверхности при приближении к соплу будут иметь вид:

$$F_x = F_l - F_{\text{тр}} - F_{\text{сц}} > 0, \quad (2.33)$$

$$F_Z = F_{\Pi} - F_T > 0 . \quad (2.34)$$

Рассматривая уравнения (2.33) и (2.34) относительно лобовой и подъемной силы получим:

$$F_L > F_{\text{Тр}} + F_{\text{Сц}} , \quad (2.35)$$

$$F_{\Pi} > F_T . \quad (2.36)$$

Подставим в уравнения (2.24) и (2.25) выражения для соответствующих сил:

– для ламинарного режима обтекания твердого тела:

$$6\pi\nu\rho_B r(v_{x_L} - W) > f\left(\frac{4}{3}\pi r^3\rho_T g + \pi r\sigma\right) + cS_{\text{Сц}} , \quad (2.37)$$

– для турбулентного режима обтекания твердого тела:

$$c_L \frac{\rho_B}{2} S_M (v_{x_T} - W)^2 > f\left(\frac{4}{3}\pi r^3\rho_T g + \pi r\sigma\right) + cS_{\text{Сц}} , \quad (2.38)$$

$$S_M \frac{\rho_B (v_{\Pi} - W)^2}{2} > \frac{4}{3}\pi r^3\rho_T g . \quad (2.39)$$

Решим уравнения (2.37), (2.38) и (2.39) относительно скорости воздушного потока:

$$v_{x_L} > \frac{f\left(\frac{4}{3}\pi r^3\rho_T g + \pi r\sigma\right) + cS_{\text{Сц}}}{6\pi\nu\rho_B r} + W , \quad (2.40)$$

$$v_{x_T} > \sqrt{\frac{f\left(\frac{4}{3}\pi r^3\rho_T g + \pi r\sigma\right) + cS_{\text{Сц}}}{c_L \frac{\rho_B}{2} S_M}} + W \quad (2.41)$$

$$v_{\Pi} > \sqrt{\frac{\frac{4}{3}\pi r^3\rho_T g}{S_M \frac{\rho_B}{2}}} + W = \sqrt{\frac{8\pi r^3\rho_T g}{3S_M\rho_B}} + W \quad (2.42)$$

Уравнения (2.40) и (2.41) выражают теоретическую скорость воздушного потока, создаваемую всасывающим соплом в зоне нахождения частицы для страгивания ее с места и последующего разгона в горизонтальной плоскости при ламинарном и турбулентном режиме обтекания твердой частицы, а уравнение (2.42) – для начала отрыва частицы вверх от подстилающей поверхности. Из приведенных формул видно, что основными факторами, влияющими на скорость воздушного потока,

необходимую для пневматической уборки, являются плотность и размеры торфяных частиц.

Процесс отрыва частицы от подстилающей поверхности происходит следующим образом. Под воздействием воздушного потока сначала происходит сдвиг с места частицы и ее перекачивание или волочение (в зависимости от формы частицы). По мере приближения к соплу и возрастания скорости воздушного потока происходит ее отрыв от поверхности подстилающего грунта и переход в аэрированное состояние.

Естественно, что для перевода частицы из неподвижного состояния в аэрированное необходимо затратить некоторое количество энергии. Эта кинетическая энергия ориентировочно может быть найдена по формуле:

$$E = \frac{mv_{\tau}^2}{2}, \text{ Дж.} \quad (2.43)$$

где v_{τ} – скорость частицы торфа в аэрированном состоянии.

Источник этой энергии – воздушный поток с параметрами: объем L (м^3) и давление P (Па), который запас потенциальной энергии. Уравнение закона сохранения энергии в результате будет иметь вид:

$$LP = \frac{mv_{\tau}^2}{2}, \quad (2.44)$$

откуда без труда можно определить соотношение параметров, от которых зависит скорость частицы торфа в аэрированном состоянии:

$$v_{\tau} = \sqrt{\frac{2LP}{m}}. \quad (2.45)$$

Как видно, одной и той же скорости движения частицы можно достичь при большем давлении и меньшем расходе, или при большем расходе и меньшем давлении.

Сам факт как сдвигания частицы с места, так и ее отрыва зависит не только от скорости воздушного потока, но и от времени воздействия на нее воздушного потока. Соответственно, эффективней будет такая система среди прочих с одинаковыми значениями скоростей всасывания во входной щели

сопла, длина оси активной зоны всасывающего факела в которой будет наибольшей.

2.5. Выводы по главе 2

В результате рассмотрения теории процесса всасывания были достигнуты следующие промежуточные результаты.

1. Обобщена информация по необходимой скорости воздушного потока на всасывающем, транспортирующем и разделительном участке торфяных пневмоуборочных машин.

2. Обобщена информация по работе всасывающего сопла и создания им всасывающего факела.

3. Предложены и определены силы, действующие на частицу торфа в активной зоне действия всасывающего факела. Отмечено, что турбулентный поток воздуха создает силу лобового давления на 3 порядка большую, чем ламинарный.

4. Составлены математические модели, позволяющие теоретически определить минимальную скорость воздушного потока, необходимую для страгивания частицы с места и отрыва от подстилающей поверхности торфяной залежи. Отмечено, что плотность торфяных частиц и их габаритные размеры являются определяющими при оценке необходимой скорости воздушного потока.

5. Теоретически определено количество энергии, которое необходимо сообщить частице для ее движения в аэрированном состоянии с заданной скоростью.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНОГО ПОЛЯ ВСАСЫВАНИЯ ТОРФЯНОЙ ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

3.1. Объект и задачи исследования

Как уже отмечалось в главе 1, на рубеже 1990-2000-х годов, благодаря новым проектам, в частности, Канадской компании «Premier Tech», разработавшей прицепную и самоходную машины SA-200 и SAM-404 с элементами металлоконструкции из нержавеющей стали и алюминиевого сплава, метод пневматической уборки обрел вторую жизнь из-за минимальных потерь торфа, отсутствию подфрезеровывания влажной залежи при уборке и ограниченной номенклатуре необходимого оборудования [98].

В России сегодня полностью отсутствует собственное производство пневмоуборочных машин, поэтому торфодобывающие компании закупают и используют в основном белорусские машины МПТУ-30 производства РУП «Могилевэнерго» и КТТ-2 производства Эстонской фирмы «Kruviks OU». Эти машины являются однотипными с Канадской SA-200 и различаются лишь в деталях (рисунок 3.1).

Существующее мнение ряда руководителей торфодобывающих компаний о том, что данные машины, могут собирать не все виды торфа (в частности, трудности возникают при уборке переходных и низинных торфов высокой степени разложения), породило необходимость и желание провести экспериментальное исследование, целью которого является оценка всасывающей способности одного из данных аппаратов, работающего на предприятии ООО «Пиндструп» в Псковской области [99].

Учитывая, что проблемы при уборке переходного и низинного торфов (имеющих большую плотность, чем верховой) возникают на стадии всасывания, было принято решение исследовать и проанализировать скоростное поле всасывающего факела пневмоуборочной машины КТТ-2.



Рисунок 3.1 – Прицепная пневмоуборочная машина КТТ-2

Исследование проводилось на территории торфодобывающего предприятия «Пиндstrup» в сезон 2019 года. Задачи исследования были следующие:

- определить скорость воздушного потока на входе в сопло машины КТТ-2;
- построить и проанализировать скоростное поле всасывания машины КТТ-2;
- обосновать математическую модель, описывающую зависимость скорости воздушного потока от расстояния удаления от сопла;
- сформулировать рекомендации для повышения эффективности всасывания пневматической системы машиной КТТ-2.

3.2. Приборы, материалы и методика исследования

Для измерения скорости воздушного потока применялся портативный термоанемометр GM8903 [100] с функцией измерения температуры воздуха, имеющий возможность совмещения с ПК и диапазон измеряемой скорости от 0,3 до 30 м/с при точности измерения $\pm 3\%$ (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Портативный термоанемометр GM8903

Для проведения исследований и снятия показаний скорости воздушного потока перед всасывающим соплом и на входе в сопло была использована металлическая координатная сетка с шагом ячейки 100 мм, в узлах которой устанавливался выносной щуп прибора (рисунок 3.3). Все показания снимались с 5-ти кратной повторяемостью.

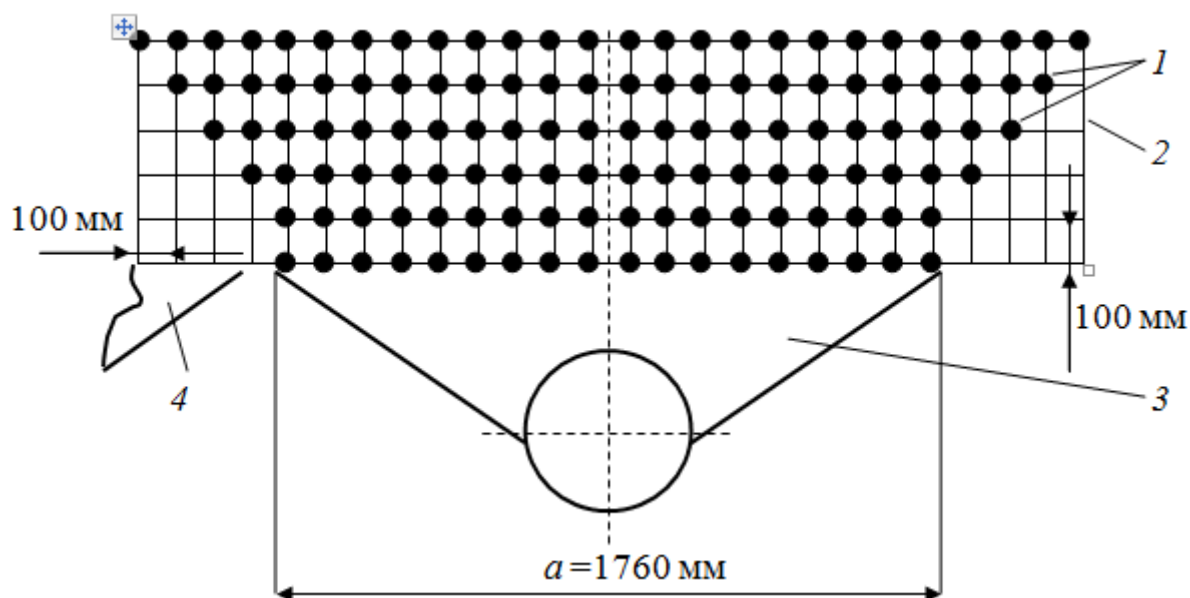


Рисунок 3.3 – Точки измерения скорости воздушного потока термоанемометром: 1 – точки (узлы) снятия показаний; 2 – координатная сетка; 3 – всасывающее сопло; 4 – соседнее всасывающее сопло

Для оценки влияния на скорость воздушного потока воздействия соседнего сопла, последнее отгораживалось воздухонепроницаемой перегородкой (рисунок 3.4), а в журнал проведения эксперимента заносились показания с влиянием и без влияния на скорость воздушного потока соседнего сопла [101].



Рисунок 3.4 – Снятие показаний скорости воздушного потока перед соплом

На момент проведения исследования атмосферное давление, определенное по барометру, составляло 751 мм рт. ст., а температура окружающего воздуха – +24°C.

3.3. Результаты исследования

Отображение данных измерений и вычислений поля всасывания в виде изотах, как это традиционно делалось при исследовании пневматических машин [67], на наш взгляд, менее информативно, чем представление результатов исследования в двухкоординатной плоскости с фиксацией значений скоростей воздушного потока.

Результаты измерений и вычислений (среднего значения по пяти замерам) представлены в виде графика зависимости скорости воздушного потока при всасывании от координаты расположения точки замера по длине сопла и по удалению от него по оси факела (рис. 3.5). Поле всасывания по соседнему соплу пневмоуборочной машины не приведено, но никаких новых обстоятельств и закономерностей при анализе полученных данных не было выявлено, графики практически полностью зеркальные [102].

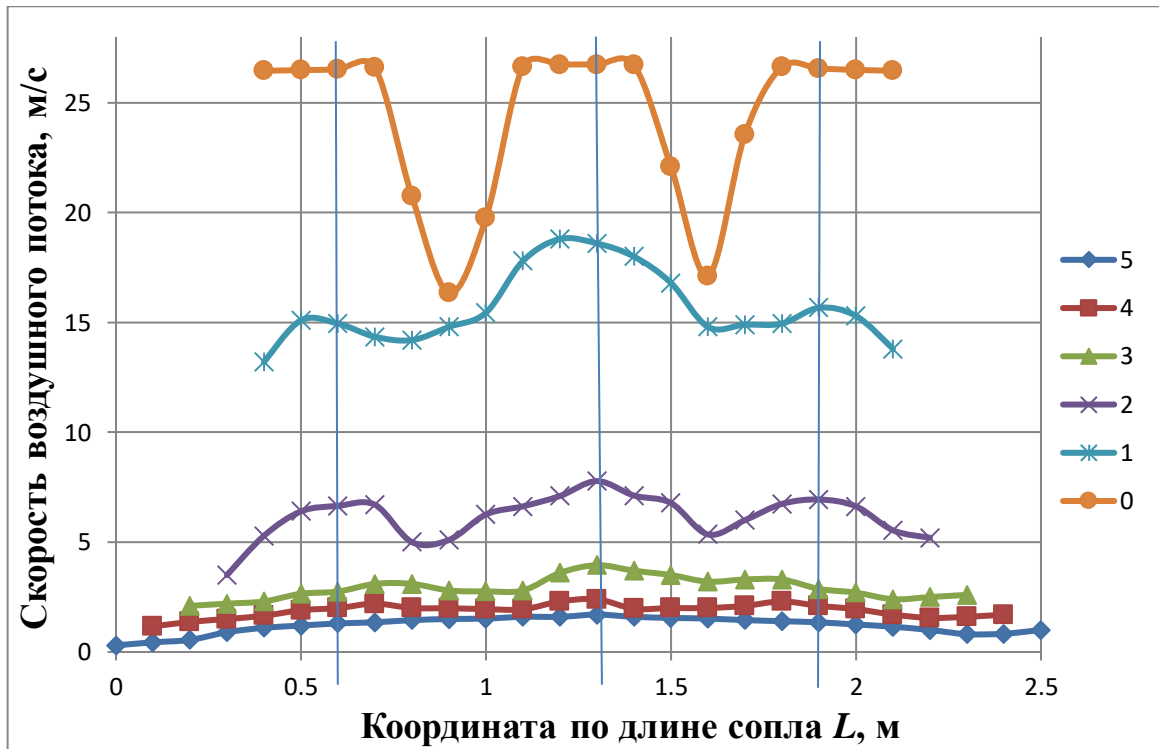


Рисунок 3.5 – Зависимость скорости воздушного потока при всасывании левым соплом машины КТТ-2 от координаты по длине сопла и расстояния удаления точки от сопла по линии оси факела: 0 – удаление равно 0 (скорость измерена на входе в сопло); 1 – удаление от сопла – 0,1 м; 2 – удаление от сопла – 0,2 м; 3 – удаление от сопла – 0,3 м; 4 – удаление от сопла – 0,4 м; 5 – удаление от сопла – 0,5 м

Анализ графических зависимостей, отображенных на рисунке 3.5, показал, что во всех кривых присутствуют две зоны «провала» скорости потока, объясняемые наличием воздухонепроницаемых усилительных ребер,

связывающих нижнюю и верхнюю кромки стеклопластикового сопла (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Усилительное воздухонепроницаемое ребро, связывающее верхнюю и нижнюю кромки всасывающего сопла

Удаление от сопла способствует сглаживанию всех кривых и значительному снижению скорости воздушного потока. Уменьшение скорости воздушного потока по мере приближения к вертикальным ограничивающим стенкам сопла отмечено также во всех случаях и объясняется трением потока о стенки. Численные значения скоростей потока с правой стороны сопла несколько выше, чем с левой, что объясняется влиянием воздушного потока от правого сопла. Установленная воздухонепроницаемая перегородка между соплами и замеры скоростей показали, что в этом случае скорости справа и слева от оси сопла одинаковы.

Для трех осей всасывающего факела ($L = 0,6; 1,3; 1,9$ м) (рисунок 3.5) построены зависимости скорости воздушного потока от расстояния удаления от всасывающего сопла (рисунок 3.7). Координаты данных осей выбраны из соображений снижения влияния на скорость воздушного потока боковых вертикальных стенок сопла и максимальной скоростью воздушного потока. Анализ и аппроксимация данных с высокой точностью ($R^2 \geq 0,98$)

произведена показательными функциями, для каждой из которых получена математическая модель [103].

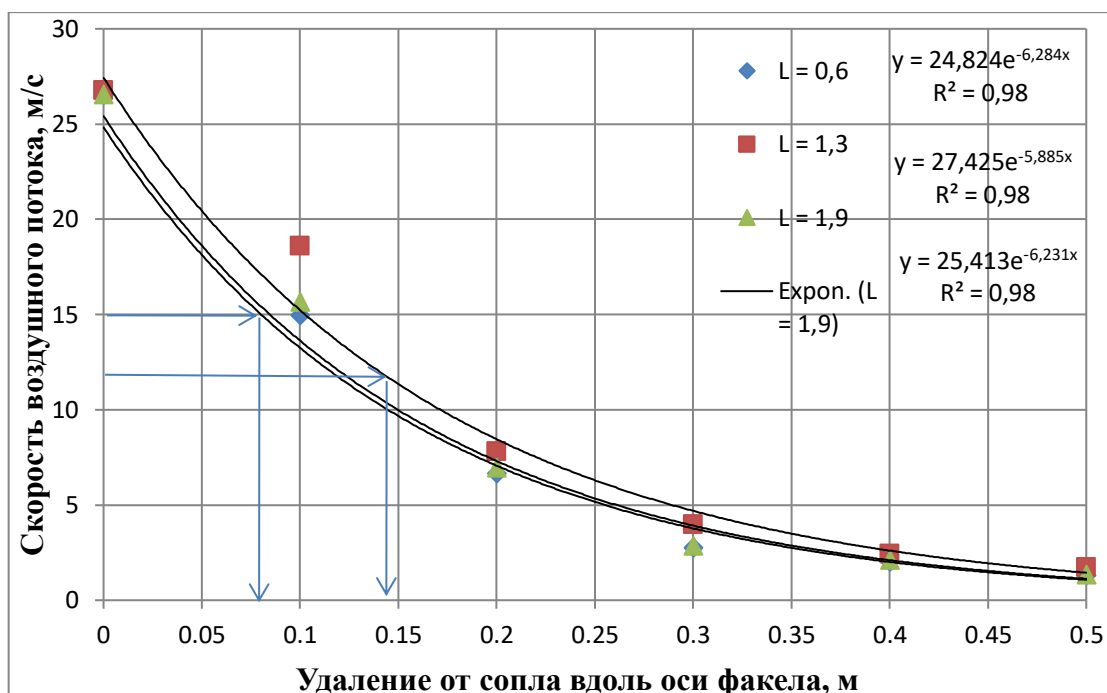


Рисунок 3.7 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния удаления от сопла

М.П. Калинушкиным по исследованиям М.Ф. Бромлея была получена упрощенная формула по оценке скорости воздушного потока в точке, отстоящей от всасывающего сопла на величину x по оси всасывающего факела:

$$v = \frac{v_0}{1 + \frac{10x^2}{S}}, \quad (3.1)$$

где v_0 – скорость воздушного потока в живом сечении сопла; x – расстояние от точки до всасывающего сопла по оси факела; S – площадь живого сечения всасывающего факела [68, 70, 79].

Для центральной оси сопла ($L = 1,3$ м) произведено сравнение скоростей воздушного потока, полученных опытным путем и рассчитанное по формуле (3.1). Выявлено относительное расхождение между ними:

$$\Delta = \frac{|v - v_{оп}|}{v} \cdot 100 \%. \quad (3.2)$$

Результаты опытов и расчетов сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Экспериментальные и расчетные значения скорости воздушного потока перед всасывающим соплом пневмоуборочной машины

КТТ-2

Удаление от сопла вдоль оси факела, м	Скорость $v_{оп}$ воздушного потока в точке с координатой по длине сопла L			Расчетное значение скорости v , м/с	Δ , %
	$L = 0,6$ м	$L = 1,3$ м	$L = 1,9$ м		
0	26,52	26,74	26,56	26,74	0
0,1	14,95	18,6	15,67	17,05	8,84
0,2	6,65	7,78	6,94	8,17	4,79
0,3	2,75	3,95	2,87	4,37	9,69
0,4	2,0	2,4	2,1	2,65	9,43
0,5	1,3	1,7	1,35	1,76	3,35

Для лежащих в центральной части сопла осей всасывающего факела можно рекомендовать формулу, полученную нами в результате аппроксимации опытных данных (рисунок 3.7):

$$v = 27,4e^{-5,9x} . \quad (3.3)$$

Учитывая, что начало пассивной зоны всасывания ограничено скоростью воздушного потока 12–15 м/с, по рисунку 3.7 определена длина активной зоны всасывающего факела при удалении от сопла, которая составила в данном случае 0,078–0,142 м.

Полученная опытным путем максимальная скорость всасывания ($v = 26,7 \pm 0,8$ м/с) и небольшая зона активного действия всасывающего факела подтверждают возникновение трудностей при уборке более плотных видов торфа. Один из выходов из данной ситуации, для увеличения эффективности работы предприятия [104], может быть в увеличении максимальной скорости всасывания и оптимизации зоны активного действия всасывающего сопла. Так, например, при анализе конструкций Советских пневмоуборочных машин было выявлено, что высота входной щели их сопел составляла от 0,05 м (БПФ-2) до 0,08 м (ППФ-3). В то время, как высота входной щели сопла

анализируемой машины составляет $h_1 = 0,1$ м при площади живого сечения $S_1 = ah_1 = 1,76 \cdot 0,1 = 0,176$ м². Можно ориентировочно предположить, какая максимальная скорость всасывания будет у сопла такой же ширины, но с высотой входной щели, например, 0,08 м при площади сечения $S_2 = ah_2 = 1,76 \cdot 0,08 = 0,1408$ м². Тогда из уравнения неразрывности потока

$$v_2 = \frac{v_1 S_1}{S_2} \quad (3.4)$$

получаем: $v_2 = \frac{26,74 \cdot 0,176}{0,1408} = 33,425$ м/с. Данная скорость всасывания находится гораздо дальше от минимальной (25 м/с), чем обеспеченная конструкцией машины КТТ-2, что, несомненно, снизит трудности при уборке более плотных торфов [105].

Оптимизация активной зоны всасывающего факела возможна, например, с помощью специального насадка, монтируемого на верхней части сопла, но для определения его формы и размеров, требуются дополнительные лабораторные исследования.

3.4. Выводы по главе 3

1. Исследован всасывающий факел пневмоуборочной машины КТТ-2. Определено максимальное ($26,7 \pm 0,8$ м/с) и минимальное ($0,3 \pm 0,001$ м/с) значения скорости воздушного потока в исследуемой зоне.

2. Получены аппроксимирующие уравнения, описывающие зависимость скорости воздушного потока в точке от удаления ее от всасывающего сопла для трех осей всасывающего факела. Определено, что расхождение опытных данных с теоретическими, рассчитанными на основании формулы (3.1) М.П. Калинушкина, не превышает 10 %. Следовательно, использование формулы 3.1 вполне оправдано и достаточно при проведении инженерных расчетов. Использование полученной нами формулы (3.3) также вполне оправдано.

3. Определена зона активного действия всасывающего факела при удалении от сопла, которая составляет 0,078–0,142 м.

4. Ввиду невысокого максимального значения скорости всасывания, рекомендовано повысить ее путем уменьшения высоты входной щели сопла до 80 мм и оптимизировать активную зону всасывания.

5. Поскольку воздухонепроницаемые усилительные ребра сопел значительно ослабляют всасывающий факел, следует рассмотреть вопрос об изготовлении их с частичной проницаемостью и ориентацией длинной стороны вдоль линий тока.

6. Повышение скорости всасывания на входе в сопло является лишь одним из методов увеличения эффективности всасывания, который возможен к применению в условиях существующей конструкции машины. Условно можно характеризовать этот метод, как «экстенсивный». В таком случае, «интенсивным» методом могут являться более рациональные параметры установки всасывающего сопла и использование насадков на сопло, частным случаем которых является козырек. Но для окончательного формулирования рекомендаций необходимо проведение широких исследований в лабораторных условиях, чему и посвящена следующая глава.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ВСАСЫВАЮЩЕГО СОПЛА ТОРФЯНОЙ ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ

4.1. Объекты и задачи исследования

Объектами исследования являются модель всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины КТТ-2 и сырье – торф с месторождения «Заплюсские Мхи» (ООО «Пиндstrup»). Поскольку месторождение сложено в основном верховым и переходным торфом, то образцы такого торфа и были отобраны на месторождении из залежи в естественном состоянии (при влаге $w = 79\text{--}82\%$) и доставлены в полиэтиленовых пакетах в лабораторию кафедры «Гидравлика, теплотехника и гидропривод» ТвГТУ. При анализе верховой торф имел степень разложения $R = 5\text{--}10\%$, а переходный – $R = 35\text{--}40\%$.

Задачами исследования являются следующие:

- приготовление опытных образцов кондиционной торфяной крошки (согласно действующих ГОСТов);
- разработка и создание лабораторной установки для оценки рациональных параметров установки всасывающего сопла;
- определение скорости витания опытных образцов торфяной крошки;
- проведение и обработка серии экспериментов для обоснования рациональных параметров установки всасывающего сопла;
- формулирование рекомендаций предприятиям, эксплуатирующим пневматические торфоуборочные машины.

4.2. Изготовление опытных образцов кондиционной торфяной крошки

Одним из основных вопросов при лабораторном формировании торфяной крошки являлся обоснованный выбор диаметра кондиционной фракции. Поскольку ГОСТы [106–109] предусматривают в фрезерной торфяной продукции лимит на засоренность кусками свыше 25 мм, а в ГОСТе [110] для оценки содержания мелочи и засоренности в торфе рекомендуется применять сита с ячейкой 25 мм, то такое сито, по соображениям максимально возможной допустимой фракции и было применено для изготовления опытных образцов (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Лабораторное сито с ячейкой 25 мм

Из торфа в естественном состоянии, без приложения значительных усилий методом пропускания через сито были изготовлены образцы верхового и переходного торфа сферической формы диаметром 25 мм (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Опытные образцы фрезерного торфа сферической формы диаметром 25 мм

Сушка и усадка опытных образцов торфа происходила естественным путем в теновом помещении лаборатории кафедры «Гидравлика, теплотехника и гидропривод» ТвГТУ на протяжении от 7 до 14 суток и контролировалась ежедневно с помощью анализатора влажности «Элвиз 2С» в лаборатории кафедры «Горное дело, природообустройство и промышленная экология» ТвГТУ (рисунок 4.3).

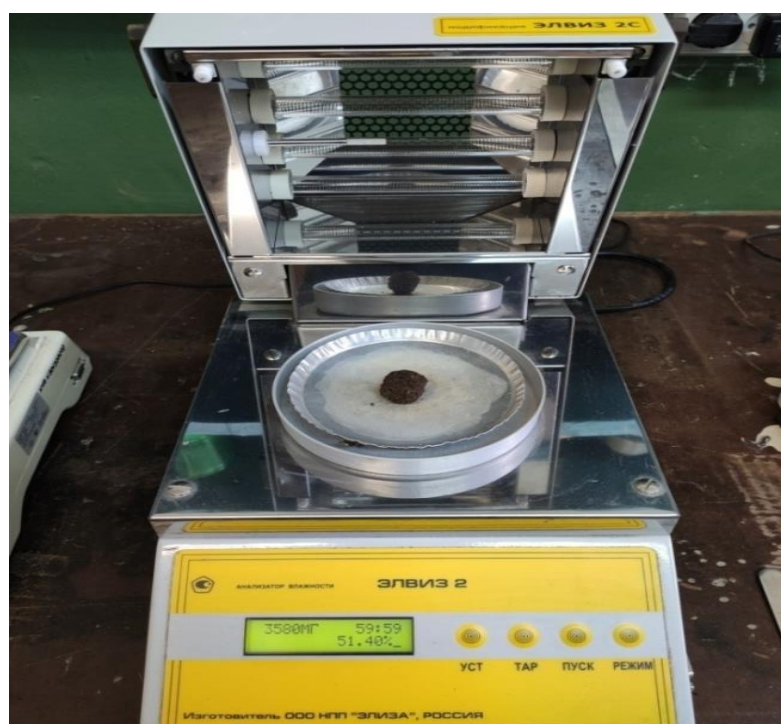


Рисунок 4.3 – Определение влаги опытных образцов торфяной крошки

Согласно ГОСТ Р 50902-2011 [106], влага фрезерного торфа, предназначенного для изготовления удобрений или сжигания, не должна превышать 52 %. В результате экспериментального исследования получено около 200 образцов верхового торфа со средним содержанием влаги 44 % и 200 образцов переходного торфа с содержанием влаги 48,45 %.

Определение плотности образцов торфа производилось по стандартной методике объемно-весовым методом с замером диаметра образца штангенциркулем точностью 0,1 мм в трех различных сечениях, определением среднего диаметра и взвешиванием образцов на весах АСОМ JW-1, имеющих точность 0,1 г. Результаты измерений и вычислений плотности как для верхового, так и для низинного торфа, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Определение плотности образцов фрезерной крошки

№ образца	Измеренные диаметры образца, мм			Средний диаметр образца $d = \frac{d_1+d_2+d_3}{3}$, мм (см)	Масса образца, <i>m</i> , гр.	Объем образца $V = \frac{1}{6}\pi d^3$, см ³	Плотность образца $\rho = \frac{m}{V}$, г/см ³	Средняя плотность торфяных частиц, г/см ³
	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	<i>d</i> ₃					
Переходный торф <i>w</i> = 48,45 %; <i>R</i> = 35–40 %								
1	23,0	20,0	21,0	21,3 (2,13)	2,5	5,057	0,494	0,518
2	19,5	21,5	22,5	21,2 (2,12)	2,4	4,986	0,481	
3	20,5	23,5	22,5	22,2 (2,22)	3,1	5,726	0,541	
4	21,3	21,7	21,5	21,5 (2,15)	2,9	5,234	0,554	
Верховой торф <i>w</i> = 44 %; <i>R</i> = 5–10 %								
1	23,5	24,6	24,8	24,3 (2,43)	2,6	7,509	0,346	0,355
2	23,4	23,8	24,5	23,9 (2,39)	2,6	7,144	0,364	
3	21,8	22,5	23,3	22,5 (2,25)	2,4	5,961	0,403	
4	20,5	22,7	20,2	21,1 (2,11)	1,5	4,916	0,305	

Таким образом, средняя плотность образцов фрезерной крошки из переходного торфа составила 0,518 г/см³, из верхового – 0,355 г/см³ [111].

4.3. Конструкция лабораторной установки для получения аэродинамической характеристики и обоснования рациональных параметров установки всасывающего сопла

Разработанная и созданная на кафедре «Технологические машины и оборудование» ТвГТУ экспериментальная лабораторная установка для определения скоростей и параметров всасывания и витания торфяной крошки состоит из источника постоянного тока 1, электродвигателя постоянного тока 2 с частотой вращения 0–3000 об/мин, вентилятора 3, спрямляющей решетки 4, витательной трубы 5, рамы витательной трубы 6, пульта управления 7, микроманометра 8, гофрированной алюминиевой трубы 9, штатива 10, экспериментального сопла 11, конвейерной ленты из 2-х слойного прорезиненного брезента 12, стоек 13 и рамы установки 14 (рисунок 4.4).

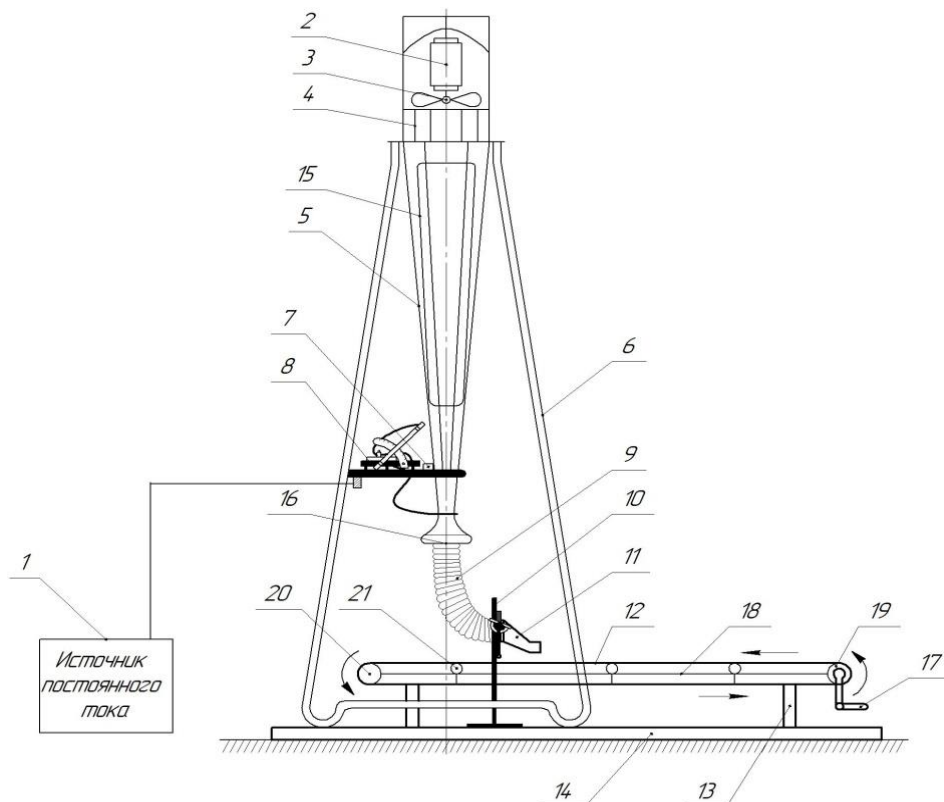


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема лабораторной установки

Витательная труба 5 представляет собой усеченную восьмигранную пирамиду с центральным углом 8° , установленную вертикально.

Восьмигранная форма трубы, а также спрямляющая решетка 4, установленная перед вентилятором 3, предотвращает закручивание воздушного потока в трубе. Для освещения внутренней части трубы и наблюдения за витающими частицами три грани трубы сделаны прозрачными, и напротив двух прозрачных граней установлены светильники 15. На третьей прозрачной грани по всей высоте трубы нанесены деления, указывающие расстояние от нижнего основания восьмигранной трубы.

От источника постоянного тока 1 через пульт управления 7 подается напряжение на двигатель 2, который приводит во вращение крыльчатку вентилятора 3. Одновременно с пульта управления 7 включается и вертикальная подсветка 15. На нижнем конце витательной трубы 8 располагается всасывающий коллектор, имеющий внутренний диаметр 90 мм. На расстоянии 45 мм от начала цилиндрической части к коллектору через штуцер присоединен микроманометр 8, заполненный этиловым спиртом, для измерения вакуумметрического давления в коллекторе 16 трубы. Через экспериментальное сопло 11, присоединенное к коллектору витательной трубы 5 гофрированной алюминиевой трубой 9 может засасываться торфяная крошка фракцией $d = 0\div 40$ мм, движущаяся по конвейерной ленте 12. Конвейерная лента 12 механически, при помощи рукоятки 17 приводится в движение навстречу экспериментальному соплу 11. Конвейер состоит из стоек 13, жестко закрепленных к раме установки 14, рамы конвейерной ленты 18, ведущего 19 и натяжного 20 ведомого барабанов, опорных роликов 21.

На рисунке 4.5 показано подключение микроманометра к коллектору 16 витательной трубы 5 (А-А) и взаимное расположение мест установки пульта управления 7, реостата регулирования постоянного напряжения 22 и микроманометра 8 (Б-Б). К раме витательной трубы 6 закреплен стол 23, на котором установлены пульт управления 7, предназначенный для включения двигателя постоянного тока 2 и подсветки 15 в витательной трубе 5, реостат для регулировки напряжения 22, влияющего на скорость всасывания

витательной установки, и микроманометр 8. Микроманометр подключен к коллектору 16 витательной трубы 5 при помощи гибкого шланга 24, прикрепленного к штуцеру 25 кольцевого трубопровода 26, установленного вокруг коллектора 16 и соединенного с ним четырьмя патрубками 27, необходимыми для выравнивания показаний давления.

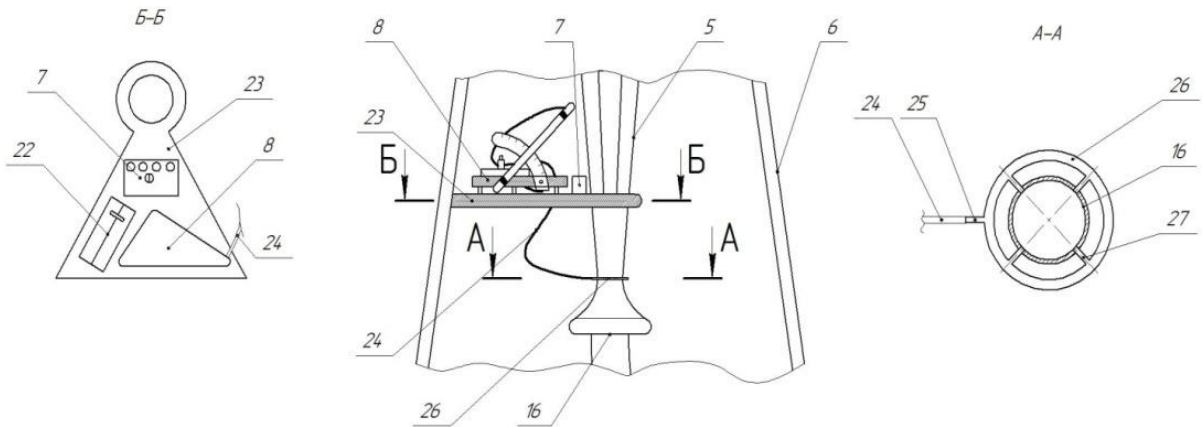


Рисунок 4.5 – Схема расположения приборов контроля лабораторной установки

На рисунке 4.6 показано крепление экспериментального сопла 11 к стойке 10. Сопло и алюминиевая гофрированная труба 9 соединены между собой муфтой 28, которая закреплена на подвижной штанге 29 и позволяет регулировать угол наклона сопла и расстояния между соплом и поверхностью конвейерной ленты 12. Для измерения угла наклона сопла установлена угломерная шкала 30 и стрелка с грузом 31. Сопло может поворачиваться на угол $0-90^\circ$ и подниматься над конвейерной лентой на расстояние $0-400$ мм.

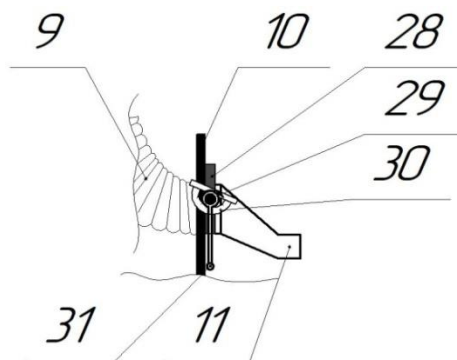


Рисунок 4.6 – Крепление всасывающего сопла

Для измерения скорости воздушного потока на различном расстоянии от нижнего края всасывающего сопла по координатной сетке (рисунок 4.7) размещается выносной щуп портативного цифрового термоанемометра GM8903. Конструкция установки защищена патентом РФ [112].



Рисунок 4.7 – Координатная сетка на ленте конвейера

4.4. Определение скорости витания опытных образцов торфяных частиц

Определение скорости витания проводилось по известной методике, описанной в работах [72–73, 113]. Опытные образцы верхового и переходного торфа забрасывались в коллектор включенной в работу витательной трубы 5 при отсоединенной гофрированной трубе 9. Реостатом 22 подбиралась частота вращения вентилятора, при которой частицы «зависали» в воздухе – витали. С помощью микроманометра 8 измерялось динамическое давление во всасывающем коллекторе, а по шкале, нанесенной на одной из прозрачных граней – минимальная H_1 и максимальная H_2 высота от коллектора, на которой происходило витание частиц.

Предварительно определялось атмосферное давление и температура окружающего воздуха.

Зависимости, по которым были произведены расчеты, а также их результаты приведены в таблице 4.2. Для сравнения по формуле (1.20) подсчитана теоретическая скорость витания с учетом коэффициента $c = 0,5$.

Таблица 4.2 – Расчет скорости витания торфяных частиц

№ п/п	Параметр	Переходный торф	Верховой торф
1	Средняя влага торфяных частиц, %	48,45	44
2	Температура окружающего воздуха t , °С	17	22
3	Атмосферное давление B , мм.рт.ст	757	749
4	Плотность воздуха ρ_B , кг/м ³	1,2	1,2
5	Средняя минимальная высота подъема частиц при витании H_1 , см	30	45
6	Средняя максимальная высота подъема частиц при витании H_2 , см	90	115
7	Средняя высота подъема частиц при витании H_{cp} , см	60	80
8	Площадь сечения витательной трубы на расстоянии H_{cp} от коллектора: $F_{тр} = 3,32(4,2 + 0,07H_{cp})^2$, см ²	234,26	318,85
9	Поправочный коэффициент на атмосферное давление и температуру: $\Delta = \frac{2,6(t+273)}{B}$	0,996	1,024
10	Показания микроманометра (высота столба спирта в трубке микроманометра) h_k , мм	217	219
11	Поправочный коэффициент микроманометра $k_{пм}$	0,8	0,8
12	Динамическое давление в коллекторе $P_k = h_k g \Delta k_{пм}$, Па	1696,2	1759,96
13	Скорость воздушного потока на уровне всасывающего коллектора: $v_k = \sqrt{\frac{2P_k}{\rho_B}}$, м/с	53,17	54,16
14	Площадь сечения всасывающего коллектора F_k , см ²	63,5	63,5
15	Скорость витания торфяных частиц: $v_s = \frac{v_k F_k}{F_{тр}}$, м/с	14,4	10,8
16	Теоретическая скорость витания торфяных частиц $v_s = \sqrt{\frac{4g d \gamma_{г}}{3c \gamma_B}}$, м/с	15,6	13,3

Как видно, теоретическая скорость витания несколько выше опытной, что можно объяснить отсутствием учета содержания влаги в торфяной частице при теоретическом расчете, однако, одинаковый их порядок подтверждает корректность проведения опытов.

4.5. Обоснование параметров установки всасывающего сопла относительно подстилающей поверхности торфяной залежи

Интенсификация добычи фрезерного торфа пневмомашинами во многом зависит от их надежности, правильного выбора параметров настройки и установки всасывающего сопла [114]. Угол установки сопла в сочетании с высотой его расположения над подстилающей поверхностью определяет длину и интенсивность всасывающего факела. Очевидно, что для уменьшения потерь энергии воздушной струи и торфа при уборке, высота установки сопла над подстилающей поверхностью должна быть минимально возможной, и находиться в пределах 0–25 мм, т. е. не должна превышать размер самой крупной фракции добываемого кондиционного торфа. Вместе с тем, сопло ни в коем случае не должно оказывать вертикального давления на расстил, так как, в противном случае, возникают эффекты придавливания и перемешивания расстила [115].

Каких-либо точных данных и рекомендаций по выбору угла установки сопла на сегодняшний день нет, за исключением положения о том, что он не может превышать угла внутреннего трения добываемой породы [67], поскольку попавший в сопло под действием струи воздуха фрезерный торф не должен самопроизвольно скатываться вниз [79, 68]. Для фрезерного торфа угол естественного откоса (трения в покое) составляет 32–45° [88]. Поскольку угол внутреннего трения сыпучего материала в движении составляет, как правило, 70 % от угла естественного откоса в покое, то, следовательно, рекомендуемый угол установки сопла – 22,4–31,5°. Канадские торфоуборочные машины SA-200, производимые компанией «Premier Tech», выпускаются с вертикально установленными соплами (угол установки сопла близок к 90°). Но опыт эксплуатации таких машин показал, что вертикальные сопла плохо вписываются в рельеф поверхности торфяных полей и образуют большие потери торфа при сборе [36]. Разброс параметров установки сопла, как видно, весьма большой. Поэтому было принято решение о проведении

серии лабораторных экспериментальных работ, целью которых является определение рациональных параметров установки и работы физической модели всасывающего сопла.

Конструкция лабораторной установки и применяемые приборы описаны в разделах 3.2 и 4.3.

Запись скоростей воздушного потока по оси всасывающего факела производилась при скорости воздуха на входе в сопло 26,69 м/с, соответствующей условиям реальной машины КТТ-2 [101–103], эксплуатируемой на предприятии ООО «Пиндstrup» [99]. Расстояние от конвейера до нижней кромки сопла принималось 0 и 25 мм. Угол установки сопла в ходе серии экспериментов изменялся от 10 до 45° с шагом 5°.

В результате обработки серии экспериментальных данных получены две группы кривых, представляющих собой зависимости скорости воздушного потока v от расстояния удаления от сопла x , угла установки сопла α и высоты h расположения сопла над поверхностью конвейерной ленты 0 и 25 мм, приведенные на рисунках 4.8 и 4.9.

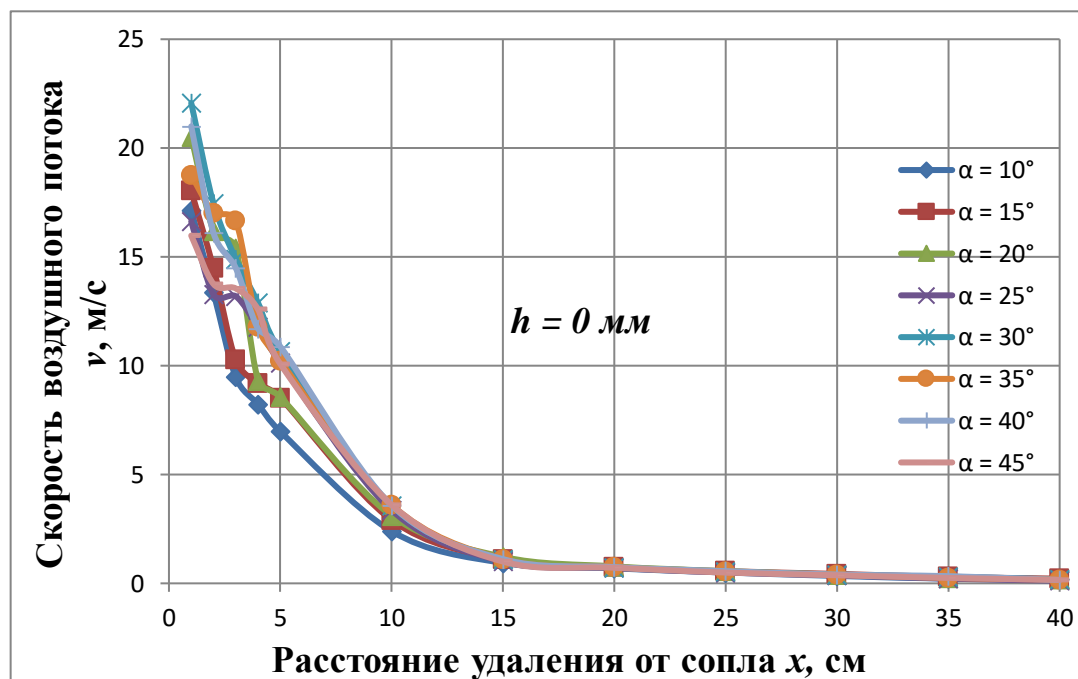


Рисунок 4.8 – Зависимость скорости воздушного потока v от расстояния удаления от сопла x при различных углах установки сопла α и высоты сопла над подстилающей поверхностью $h = 0$ мм

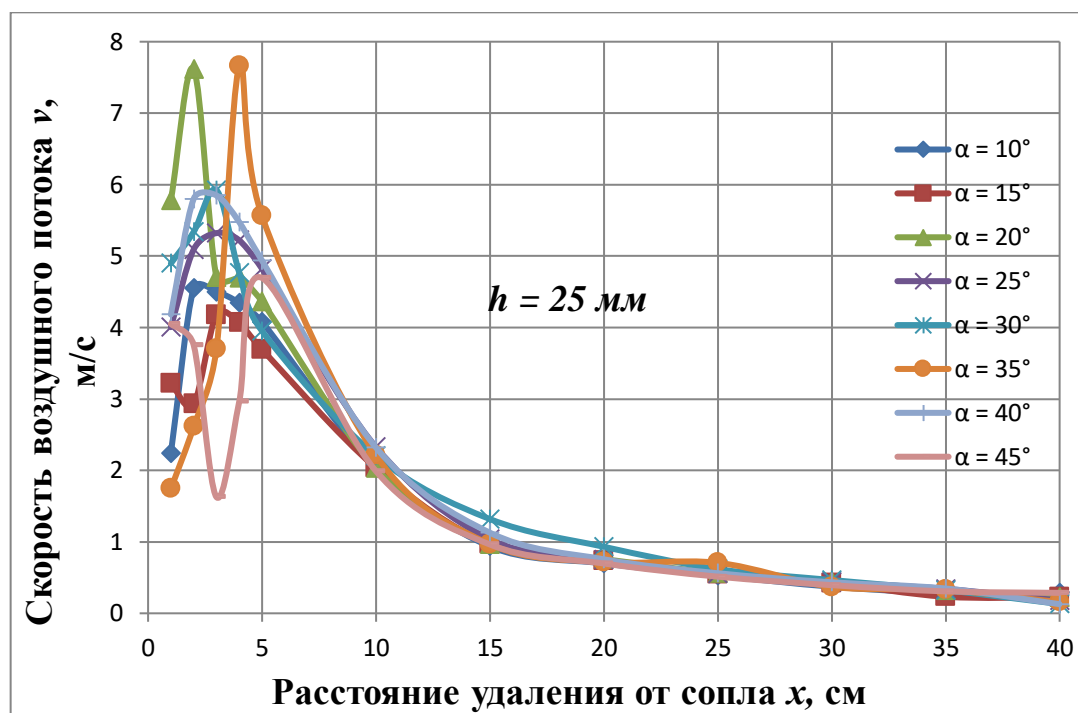


Рисунок 4.9 – Зависимость скорости воздушного потока v от расстояния удаления от сопла x при различных углах установки сопла α и высоты сопла над подстилающей поверхностью $h = 25$ мм

По результатам анализа рисунка 4.8 можно отметить следующее. На расстоянии 10 см от нижнего края сопла скорость воздушного потока понижается в 4,5–7 раз по сравнению со скоростью на расстоянии удаления в 1 см. Скорость воздушного потока менее 1 м/с наблюдается во всех случаях на расстоянии 20 см удаления от сопла. При удалении точки замера от сопла на расстояние более 15 см зависимость скорости от расстояния ввиду незначительных колебаний можно считать линейной. Отсутствие характерных «пиков» практически во всех случаях говорит о слабой турбулентности воздушного потока. Незначительное проявление турбулентности выражается небольшими возмущениями на кривых с $\alpha = 15$ – 45° . Наибольшее значение скорости воздушного потока на расстоянии в 1 см от нижнего края сопла наблюдаются для угла установки сопла $\alpha = 30^\circ$.

По результатам анализа рисунка 4.9 можно отметить следующее. На расстоянии 10 см от нижнего края сопла скорость воздушного потока

понижается в 1,5–2 раза по сравнению со скоростью на расстоянии в 1 см. Скорость воздушного потока менее 1 м/с наблюдается в подавляющем большинстве случаев на расстоянии 20 см удаления от сопла. Максимальная скорость всасывания наблюдается на расстоянии 2–5 см от нижнего края сопла (в зависимости от угла установки сопла). При удалении точки замера от сопла на расстояние более 20 см зависимость скорости от расстояния ввиду незначительных колебаний можно считать линейной. Наличие характерных «пиков» во всех случаях говорит о сильной турбулентности воздушного потока. Наиболее сильное турбулентное движение проявляется небольшими возмущениями на кривых с $\alpha = 20\text{--}35^\circ$. Наибольшее значение скорости воздушного потока на расстоянии в 1 см от нижнего края сопла наблюдаются для углов установки сопла $\alpha = 20\text{--}45^\circ$ [116].

Таким образом, можно сделать следующие промежуточные выводы. Поскольку обеспечить нулевое расстояние между всасывающим соплом и поверхностью расстила торфяной крошки на практике невозможно, следует ограничиться расстоянием в 25 мм, равном максимальному размеру кондиционной торфяной крошки. К тому же, слабая турбулентность воздушного потока для нулевого расстояния над подстилающей поверхностью говорит о сложных условиях создания подъемной силы для отрыва частицы от подстилающей поверхности. Предварительным рациональным углом установки сопла по параметрам значения и изменения скорости воздушного потока на данном этапе исследования можно считать $\alpha = 30 \pm 5^\circ$, как середину интервала наибольшего значения скорости воздушного потока на расстоянии в 1 см от нижнего края сопла. Для более точного обоснования рационального угла установки сопла необходимо было провести серию экспериментальных работ по оценке всасывания торфяной крошки с заданными свойствами соплами, смонтированными под углами $10\text{--}45^\circ$ [117]. Ведь вероятность всасывания частицы тем выше, чем больше длина оси активной зоны всасывающего факела. Такое исследование помогло бы окончательно сформулировать требования к параметрам установки

всасывающего сопла, а, следовательно, способствовало бы более рациональному хозяйствованию и бережному обращению с бесценным природным ресурсом, каковым, без сомнения, является торф [98, 104]. Такое исследование было нами проведено.

В ходе исследования опытные образцы фрезерной крошки помещались на ленту конвейера лабораторной установки (п. 4.3), включался вентилятор, с помощью реостата устанавливалась скорость всасывания, близкая к реальной для машины КТТ-2 ($26,7 \pm 0,8$ м/с – см. п. 3.3) и лента приводилась в движение. Скорость всасывания контролировалась термоанемометром GM8903 (см. п. 3.2) и составляла в среднем $26,7 \pm 0,8$ м/с. При приближении образца фрезерной крошки к всасывающему соплу (рисунок 4.10) наступал момент разгона, отрыва крошки от поверхности ленты и всасывание.



Рисунок 4.10 – Экспериментальное исследование по всасыванию опытных образцов фрезерной торфяной крошки

Расстояние от сопла до точки, в которой начинался «разгон» крошки под воздействием воздушной струи измерялось линейкой с точностью до 1 миллиметра, эксперимент повторялся не менее 6 раз, после чего определялось среднее значение расстояния, представляющее собой длину оси активной зоны всасывающего факела [118]. Результаты экспериментального исследования сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Длина оси активной зоны всасывающего факела

Угол установки сопла α , °	Длина оси активной зоны всасывающего факела, мм	
	Переходный торф ($R = 35\text{--}40\%$, $\rho = 0,355 \text{ кг/м}^3$, $w = 48,45\%$)	Верховой торф ($R = 5\text{--}10\%$, $\rho = 0,518 \text{ кг/м}^3$, $w = 44\%$)
10	10	20
15	20	40
20	30	45
25	40	65
30	65	70
35	60	65
40	55	60
45	40	55

На основании табличных данных построен график зависимости длины оси активной зоны всасывающего факела от угла установки сопла при расстоянии от сопла до подстилающей поверхности 25 мм и двух видах торфа – верховом и переходном (рисунок 4.11) [119, 120]. Кривые аппроксимированы полиномами второго порядка с указанием коэффициентов детерминации R^2 .

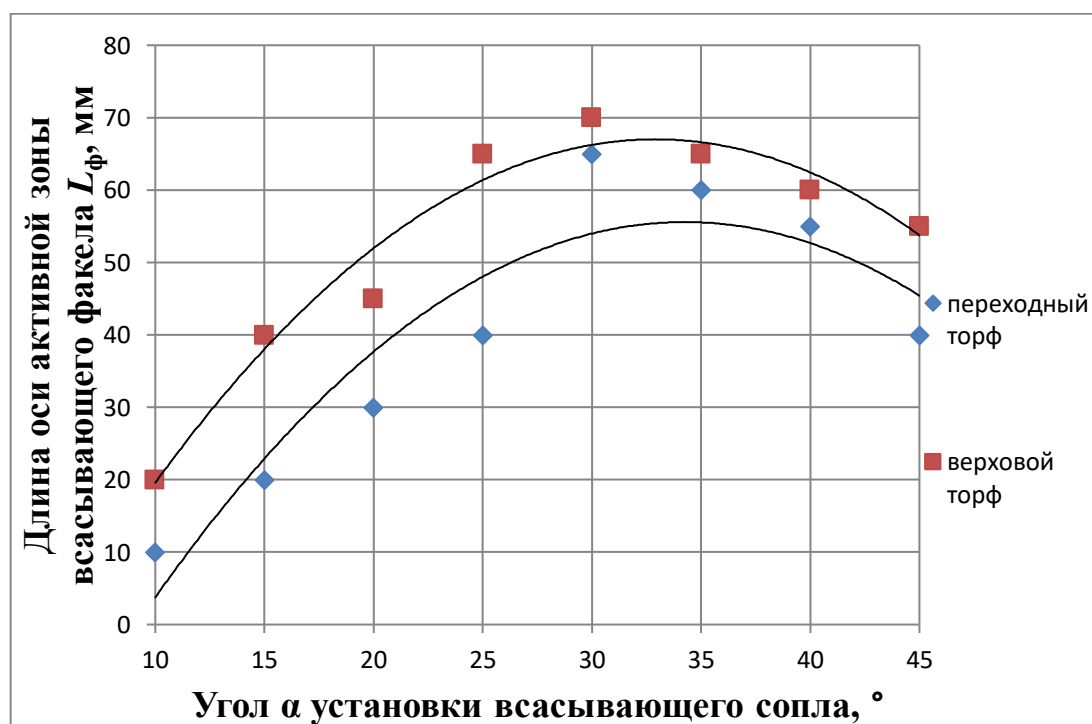


Рисунок 4.11 – Зависимость длины оси активной зоны всасывающего факела от угла установки всасывающего сопла

В результате нами получены две зависимости:

– для исследованного верхового торфа:

$$L_{\text{фв}} = -0,09\alpha^2 + 5,95\alpha - 30,9, \quad R^2 = 0,95, \quad (4.1)$$

– для исследованного переходного торфа:

$$L_{\text{фп}} = -0,09\alpha^2 + 6,04\alpha - 47,8, \quad R^2 = 0,87. \quad (4.2)$$

Построенные кривые указывают на максимальные величины длины оси активной зоны всасывающего факела при установке сопла торфяной пневмоуборочной машины под углом $\alpha = 30\text{--}35^\circ$. Таким образом, и по критерию скорости всасывания и по критерию максимальной длины оси активной зоны всасывающего факела, углы установки сопла совпали. Причем, для верхового торфа $\alpha \rightarrow 30^\circ$, а для переходного $\alpha \rightarrow 35^\circ$ [118, 119].

Для оценки сходства или различия статистических показателей зависимостей, представленных на рисунке 4.11 и подверженных влиянию случайных факторов, применялся метод проверки статистических гипотез [121, 122]. На начальном этапе была выдвинута нулевая гипотеза, состоящая в предположении, что генеральные средние исследованных зависимостей совпадают. При этом длина оси активной зоны всасывающего факела определяется общим для двух случаев набором факторов. Критериями сравнения служила статистика $|\tilde{v}|$ с учетом объемов выборок $n_{\text{верх}}$ и $n_{\text{перех}}$, параметра c и числа степеней свободы $f_{\text{верх}}$ и $f_{\text{перех}}$:

$$|\tilde{v}| = \frac{|\bar{L}_{\text{ф.верх}} - \bar{L}_{\text{ф.перех}}|}{\sqrt{\frac{1}{n_{\text{верх}}}D_{\text{верх}} + \frac{1}{n_{\text{перех}}}D_{\text{перех}}}}, \quad (4.3)$$

$$c = \frac{\frac{1}{n_{\text{верх}}}D_{\text{верх}}}{\frac{1}{n_{\text{верх}}}D_{\text{верх}} + \frac{1}{n_{\text{перех}}}D_{\text{перех}}}, \quad (4.4)$$

$$f_{\text{верх}} = n_{\text{верх}} - 1, \quad (4.5)$$

$$f_{\text{перех}} = n_{\text{перех}} - 1, \quad (4.6)$$

где $\bar{L}_{\text{ф.верх}}$ и $\bar{L}_{\text{ф.перех}}$ – средние значения длины оси активной зоны всасывающего факела по двум выборкам, мм; $D_{\text{верх}}$ и $D_{\text{перех}}$ – несмещенные оценки дисперсий по двум выборкам:

$$D_{\text{верх}} = \frac{\sum(L_{\text{ф.иверх}} - \bar{L}_{\text{ф.верх}})^2}{f_{\text{верх}}}, \quad (4.7)$$

$$D_{\text{перех}} = \frac{\sum(L_{\text{ф.јперех}} - \bar{L}_{\text{ф.перех}})^2}{f_{\text{перех}}}, \quad (4.8)$$

ГДЕ $L_{\text{ф.иверх}}$ и $L_{\text{ф.јперех}}$ – точечные значения длины оси активной зоны всасывающего факела для верхового и для переходного торфа, мм.

Сравнению были подвергнуты выборки значений длины оси активной зоны всасывающего факела для верхового и переходного торфа, полученные при всасывании соплом с углами установки 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° . В этом случае $n_{\text{верх}} = n_{\text{перех}} = 8$; $f_{\text{верх}} = f_{\text{перех}} = 7$. Расчет статистических характеристик выборок сведен в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Статистические характеристики длины оси активной зоны всасывающего факела полученные при всасывании соплом опытных образцов фрезерной крошки из верхового и переходного торфа

$L_{\text{ф.иверх}}, \text{ мм}$	$L_{\text{ф.иверх}} - \bar{L}_{\text{ф.верх}}$	$(L_{\text{ф.иверх}} - \bar{L}_{\text{ф.верх}})^2$
20	-32,5	1056,25
40	-12,5	156,25
45	-7,5	56,25
65	12,5	156,25
70	17,5	306,25
65	12,5	156,25
60	7,5	56,25
55	2,5	6,25
$\sum L_{\text{ф.иверх}} = 420; \bar{L}_{\text{ф.верх}} = 52,5$		$\sum(L_{\text{ф.иверх}} - \bar{L}_{\text{ф.верх}})^2 = 1950$
$D_{\text{верх}} = 278,57$		
$L_{\text{ф.јперех}}, \text{ мм}$	$L_{\text{ф.јперех}} - \bar{L}_{\text{ф.перех}}$	$(L_{\text{ф.јперех}} - \bar{L}_{\text{ф.перех}})^2$
10	-30	900
20	-20	400
30	-10	100
40	0	0
65	25	625
60	20	400
55	15	225
40	0	0
$\sum L_{\text{ф.јперех}} = 320; \bar{L}_{\text{ф.перех}} = 40$		$\sum(L_{\text{ф.јперех}} - \bar{L}_{\text{ф.перех}})^2 = 2650$
$D_{\text{перех}} = 378,571$		

Расчет статистики $|\tilde{v}|$ и параметра c по зависимостям (4.3) и (4.4) приведен ниже.

$$|\tilde{v}| = \frac{|52,5-40|}{\sqrt{\frac{1}{8} \cdot 278,57 + \frac{1}{8} \cdot 378,571}} = \frac{12,5}{\sqrt{34,821+47,321}} = 1,379 ;$$

$$c = \frac{\frac{1}{8} \cdot 278,57}{\frac{1}{8} \cdot 278,57 + \frac{1}{8} \cdot 378,571} = \frac{34,821}{34,821+47,321} = 0,424 .$$

Состоятельность нулевой гипотезы на уровне значимости $\alpha = 0,05$ проверяется сравнением рассчитанного значения статистики $|\tilde{v}|$ с ее табличным значением $|v|(c; f_{\text{верх}}; f_{\text{перех}}; \alpha)$. Если табличное значение статистики превышает рассчитанное по формуле (4.3), то нулевая гипотеза принимается [121]. При этом табличное значение находится методом интерполяции. В рассматриваемом случае:

$$|v|(c; f_{\text{верх}}; f_{\text{перех}}; \alpha) = |v|(0,424; 7; 7; 0,05) \approx 2,155.$$

Поскольку табличные значения статистики выше рассчитанного, нулевая гипотеза принимается. Можно считать, что на длину оси активной зоны всасывающего факела влияют одни и те же факторы, а сравниваемые средние являются выборками из одной и той же генеральной совокупности.

Таким образом, по факторам скорости всасывания и максимальной длины оси активной зоны всасывающего факела, следует считать угол установки сопла $30-35^\circ$ при высоте расположения сопла над подстилающей поверхностью 25 мм.

Однако, остается вопрос, насколько длину оси активной зоны всасывающего факела можно считать параметром эффективности всасывания? Для выяснения этого вопроса был проведен эксперимент: на ленту конвейера помещались торфяные частицы из верхового и низинного торфа в количестве 30 штук и производилось пробное всасывание при тех же углах установки сопла, при которых определялась максимальная длина оси активной зоны всасывающего факела, т. е. $10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45^\circ$. Для того, чтобы фрезерную крошку можно было использовать повторно, в конструкцию установки были внесены некоторые изменения: между

алюминиевой гофрой, соединяющей сопло с витательной трубой и всасывающим коллектором витательной трубы вставлялся специальный герметичный мешок из плотной резины, в два раза увеличивающий площадь сечение воздуховода, и, соответственно, резко снижающий скорость потока. В результате, крошка, не достигнув коллектора витательной установки, оседала на дне мешка. В случае разрушения крошка заменялась новой. Результаты представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – *Количество торфяных частиц, поднятых с поверхности конвейерной ленты потоком воздуха*

Вид торфа	Угол установки всасывающего сопла α , °							
	10	15	20	25	30	35	40	45
Верховой	26	28	30	30	30	30	30	30
Переходный	24	25	28	30	30	30	30	30

Оценивая результаты таблицы 4.5 можно сказать следующее. Бесспорно, центром рассеяния является, все-таки угол установки сопла 30–35°. Максимально возможное количество частиц, поднятых с поверхности ленты при ббльших углах установки сопла, объясняется ббльшими подъемными силами, являющимися вертикальными проекциями лобовых сил давления (п. 2.3). Но при увеличении угла установки сопла, снижается длина оси активной зоны всасывающего факела (рисунок 4.11), следовательно, поскольку снижается время воздействия воздушного потока на частицу (а в процессе поступательного движения машины это время будет еще меньше!), вероятность подъема частицы с подстилающей поверхности становится меньше. Понижение количества частиц, поднятых с поверхности ленты, при углах 10–15°, как и в случае с длиной оси активной зоны всасывающего факела (рисунок 4.11), можно объяснить понижением эффективности всасывания вследствие небольших значений вертикальных проекций лобовой силы давления. В целом же, напрашивается вывод о возможности

использования длины оси активной зоны всасывающего факела, как косвенного параметра эффективности всасывания.

Проверка адекватности теоретической скорости воздушного потока, необходимой для страгивания торфяной шарообразной частицы с места показала, что для условий данного эксперимента ($r_{\text{верх}} = 0,011475$ м; $r_{\text{перех}} = 0,010775$ м (таблица 4.1); $t = 20^\circ\text{C}$; $\rho_{\text{в}} = 1,205$ кг/м³; $\rho_{\text{т верх}} = 518$ кг/м³; $\rho_{\text{т перех}} = 355$ кг/м³; $c_{\text{верх}} = 0,787$ Н/м; $c_{\text{перех}} = 0,758$ Н/м; $S_{\text{сц верх}} \approx 0,000827$ м²; $S_{\text{сц перех}} \approx 0,000729$ м²; $c_{\text{л}} = 0,5$; $S_{\text{м верх}} = 0,000413$ м²; $S_{\text{м перех}} = 0,000365$ м²; $\alpha = 30\text{--}35^\circ$; $W = 0$), выражение (2.30) требует уточнения причем, ввиду того, что силы сцепления и адгезии на порядок меньше, чем сила тяжести, в ориентировочных расчетах их можно не учитывать. И тогда:

$$v_{x_{\text{т}}} > K \sqrt{\frac{\frac{4}{3} f \pi r^3 \rho_{\text{т}} g}{c_{\text{л}} \frac{\rho_{\text{в}}}{2} S_{\text{м}}}} + W \quad (4.9)$$

где K – уточняющий коэффициент, зависящий от вида торфа, угла установки всасывающего сопла, высоты расположения сопла над подстилающей поверхностью и др.; для верхового торфа $K = 0,47$; для переходного $K = 0,42$.

4.6. Выводы по главе 4

Экспериментальное исследование, проведенное в лабораторных условиях ТвГТУ, позволило определить аэродинамические параметры торфяных частиц максимальной кондиционной фракции, обосновать высоту расположения сопла над подстилающей поверхностью и определить рациональный угол расположения сопла над подстилающей поверхностью по критерию максимальной длины оси активной зоны всасывающего факела, которые и рекомендуются производителям торфяной продукции.

Получены следующие промежуточные результаты.

1. Плотность торфяных частиц максимальной кондиционной фракции (25 мм), полученной из верхового ($R = 5-10\%$, $w = 44\%$) и переходного ($R = 35-40\%$, $w = 44\%$) торфа составила, соответственно, 0,355 и 0,518 г/см³.

2. Скорость витания кондиционных торфяных частиц для верхового и переходного торфа составила, соответственно, 10,8 и 14,4 м/с.

3. Высота расположения сопла над подстилающей поверхностью торфяной залежи не должна превышать размера максимальной кондиционной фракции, т. е. 25 мм.

4. Рациональным углом расположения всасывающего сопла по факторам скорости воздушного потока и максимальной длины оси всасывающего факела следует считать угол $\alpha = 30-35^\circ$. Причем, для исследованных верхового торфа $\alpha \rightarrow 30^\circ$, а для переходного $\alpha \rightarrow 35^\circ$.

5. Статистический анализ параметров, определяющих максимальную длину оси всасывающего факела, проведенный по методу проверки статистических гипотез, показал, что при определении длины оси всасывающего факела, на максимальное ее значение при всасывании и верхового и переходного торфа влияет одинаковый набор факторов. Случайная составляющая здесь отсутствует на уровне достоверности 95 %.

6. Получено уточняющее выражение для определения скорости воздушного потока, необходимой для страгивания частицы с места в исследованных условиях.

7. Результаты экспериментально проведенного исследования показывают, что теоретически рассчитанная по формуле (2.27) скорость воздушного потока является достаточной для отрыва частицы от подстилающей поверхности.

8. Следует отметить, что существует явная необходимость интенсифицировать процесс всасывания торфяной крошки путем специальных насадков, или мундштуков на сопло, по аналогии с известным «kozyрьком», устанавливаемым на сопло торфяного пневматического валкователя [115]. Изучению этого вопроса и посвящена следующая глава.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МУНДШТУКА НА СОПЛО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВСАСЫВАНИЯ ТОРФЯНОЙ КРОШКИ

5.1. Предпосылки экспериментального исследования

Об интенсификации процесса всасывания за счет установки мундштуков, или насадков, на сопло было известно и ранее. Так, например, в работе [115] описано применение на пневматических валкователях торфа ПВП-10, так называемого, активизатора струи в виде козырька (рисунок 5.1).

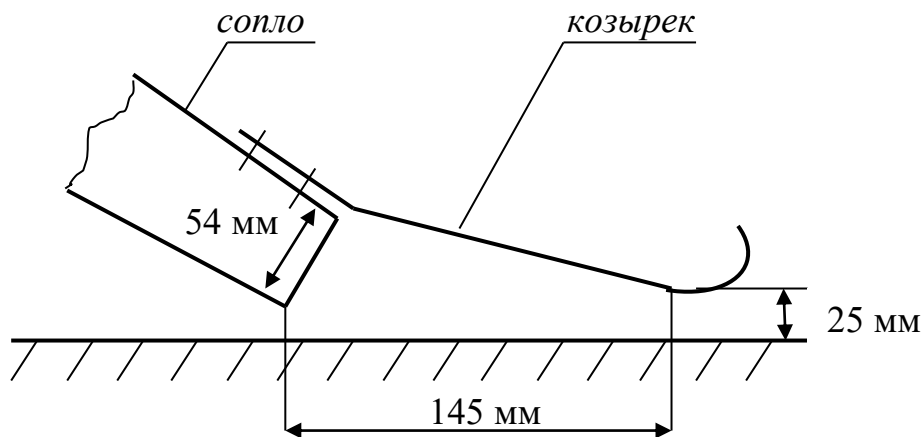


Рисунок 5.1 – Активизатор торфяного растила в виде «козырька»

Передняя часть козырька, как видно из рисунка, выполнена по лемнискате, сильно снижающей сопротивление воздушному потоку.

В результате применения козырька-активизатора были выявлены неиспользованные резервы и получены выводы, которые из-за важности приведем здесь полностью: «...активизирующие козырьки во-первых, перенесли область передачи энергии из вне машины внутрь ее; во-вторых, приблизили струю у залежи и сжали ее, увеличив, тем самым, скорость воздуха на входе в сопло и во всей подкозырьковой области; в третьих, ценой некоторых, вполне оправданных потерь мощности воздушной струи, реализовали под козырьком однородное силовое поле; в четвертых,

увеличили вертикальную составляющую силы динамического разряжения в несколько раз за счет, разумеется, горизонтальной – скоростной составляющей (пропорционально возросли и цикловые сборы); в пятых, довели передачу энергии в факеле всасывающего сопла до величин, близких к теоретическому пределу, и дали возможность установить величину этого предела; в шестых, активизировали работу нагнетательного сопла; в седьмых, значительно уменьшили пыление (почти до полной стерильности); в восьмых, упростили и впервые позволили решить проблему работы пневмомашин на торфе в теоретическом плане» [115].

Подтверждение работоспособности и необходимости козырька мы находим и в работе [79]: «Для того, чтобы сконцентрировать воздушный поток у входной щели сопла устанавливается козырек. Опыт показывает, что длина козырька ограничивается величиной сопротивления на входе, которое возрастает при чрезмерно длинном козырьке. Для плавности входа потока в сопло верхняя входная кромка сопла, а также боковые его кромки делаются с закруглениями. Закругление это выполняется либо по кривой, называемой лемниской, либо по дуге круга. При наличии козырька закругление делается на нем. Высота входной щели сопла делается такой, чтобы наиболее крупные частицы транспортируемого материала могли беспрепятственно засасываться и перемещаться в сопле».

Исследованию и обоснованию параметров сопла с усиленным козырьком посвящен ряд работ Белорусских ученых [123–125]. Эксперименты проводились ими на модели сопла, имеющего входное отверстие размером 400×40 мм. Длина козырька L принималась в опытах от 0 до 175 мм, а угол установки сопла α не превышал 35°. Лабораторная установка позволяла изменять среднюю скорость воздуха во входном отверстии от 22 до 39 м/с. На основе опытных данных были построены спектры всасывания различных по конструкции всасывающих сопел. Само сопло с козырьком представлено на рисунке 5.2.

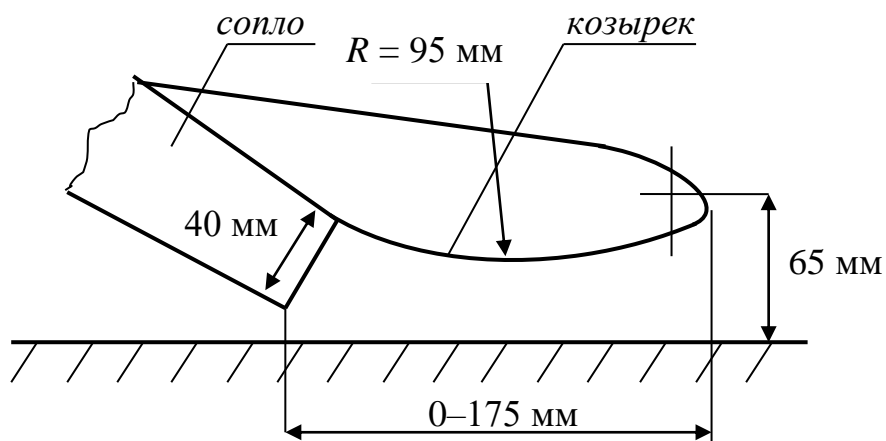


Рисунок 5.2 – Входная часть сопла с усиленным козырьком

В результате работ было определено, что максимальная длина козырька не должна превышать 175 мм. Вместе с тем, в работе [124] были выявлены зависимости потери давления на всасывание от длины козырька. Разработана также и некая «спрямляющая» решетка в виде параллельных лопастей, устанавливаемая во входную щель сопла под козырьком и, как описано в работах [124, 125], снижающая относительные потери давления. Однако, как показал опыт эксплуатации таких спрямляющих решеток, несмотря на явные преимущества в энергозатратах ввиду снижения потерь давления, эксплуатация машин с такими усовершенствованиями была сильно затруднена из-за забивания образовавшихся щелей между лопастями комками фрезерного торфа некондиционной фракции.

В области обеспыливания следует особо выделить работу [126], в которой описывается насадок в форме, представленной на рисунке 5.3. Автором исследованы параметры такого насадка в диапазоне: $b = 0,005; 0,02; 0,035$ м – ширина щели; $B = 0,03; 0,1; 0,17$ – ширина полки; $h = 0,005; 0,008; 0,011$ – высота расположения насадка над поверхностью. В ходе исследования изучалось взаимодействие насадка с древесной шлифовальной пылью лиственных и хвойных пород влажностью $w = 8 \pm 2$ %, лежащей на различных поверхностях слоем толщиной 3 мм при температуре воздуха 20 °С и влажности воздуха $W = 60$ %.

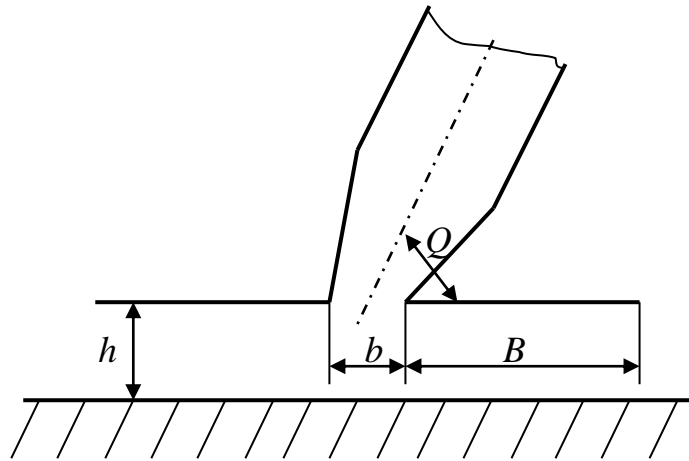


Рисунок 5.3 – Форма насадка коллекторного типа, предложенного для сбора древесной пыли

С помощью применения метода математического программирования автором определены оптимальные размеры пылеуборочных насадков коллекторного типа для удаления древесной пыли с горизонтальных поверхностей: $b = 0,018$ м, $B = 0,13$ м, $h = 0,005$ м.

Анализируя вышеприведенные примеры можно сделать вывод о том, что ученые в различных отраслях промышленности видели резервы увеличения производительности пневматических машин именно в рациональной форме насадка на сопло. Причем, во всех работах подчеркивается, что насадка «вытягивает» всасывающий факел из сопла, удлиняя зону всасывания.

Однако, односторонний козырек, как на рисунке 5.1, или полка, как на рисунке 5.3, не могут являться окончательным решением проблемы эффективности всасывания из-за непродуктивного движения воздушного потока через боковые поверхности, где щель явно больше, чем перед закруглением козырька. Кроме того, длина козырька, или насадка, никак не привязанная к скорости воздушного потока и высоте входной щели сопла, нам представляется параметром весьма дискуссионным. В связи с таким выводом и было решено исследовать работу мундштуков, имеющих как верхнюю, так и боковые грани.

5.2. Модели мундштуков на всасывающие сопла

В соответствии с вышеизложенными соображениями, нами осуществлено исследование эффективности работы ряда разработанных, запатентованных [119, 127] и созданных физических моделей мундштуков на сопла, принципиальная схема которых представлена на рисунке 5.4.

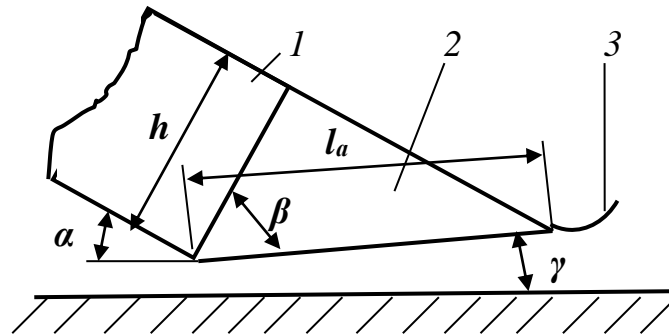


Рисунок 5.4 – Принципиальная схема и углы установки сопла и мундштука:

1 – всасывающее сопло; 2 – мундштук; 3 – козырек перед входом в мундштук; α – угол установки всасывающего сопла; β – угол активации расстила; γ – задний угол мундштука; l_a – активная длина мундштука; h – высота входной щели сопла

В качестве пояснений к рисунку следует отметить, что козырек перед входом в мундштук, как и передняя часть козырька, выполненная по лемнискате (рисунок 5.1), был спроектирован для снижения сопротивления движению воздушного потока. Угол β , по сути, являющийся передним углом мундштука был назван нами «углом активации расстила», поскольку именно этот угол, по нашему мнению, влияет на эффективность работы мундштука. Угол θ , представляющий собой сумму углов установки сопла и активации расстила ($\theta = \alpha + \beta$), назван нами «углом атаки расстила». Подобная «геометрическая» трактовка позволяет увязать все параметры мундштука с высотой входной щели всасывающего сопла h .

Всего было спроектировано и изготовлено 4 модели мундштуков с углами активации расстила $\beta = 15, 30, 45$ и 60° (рисунок 5.5).

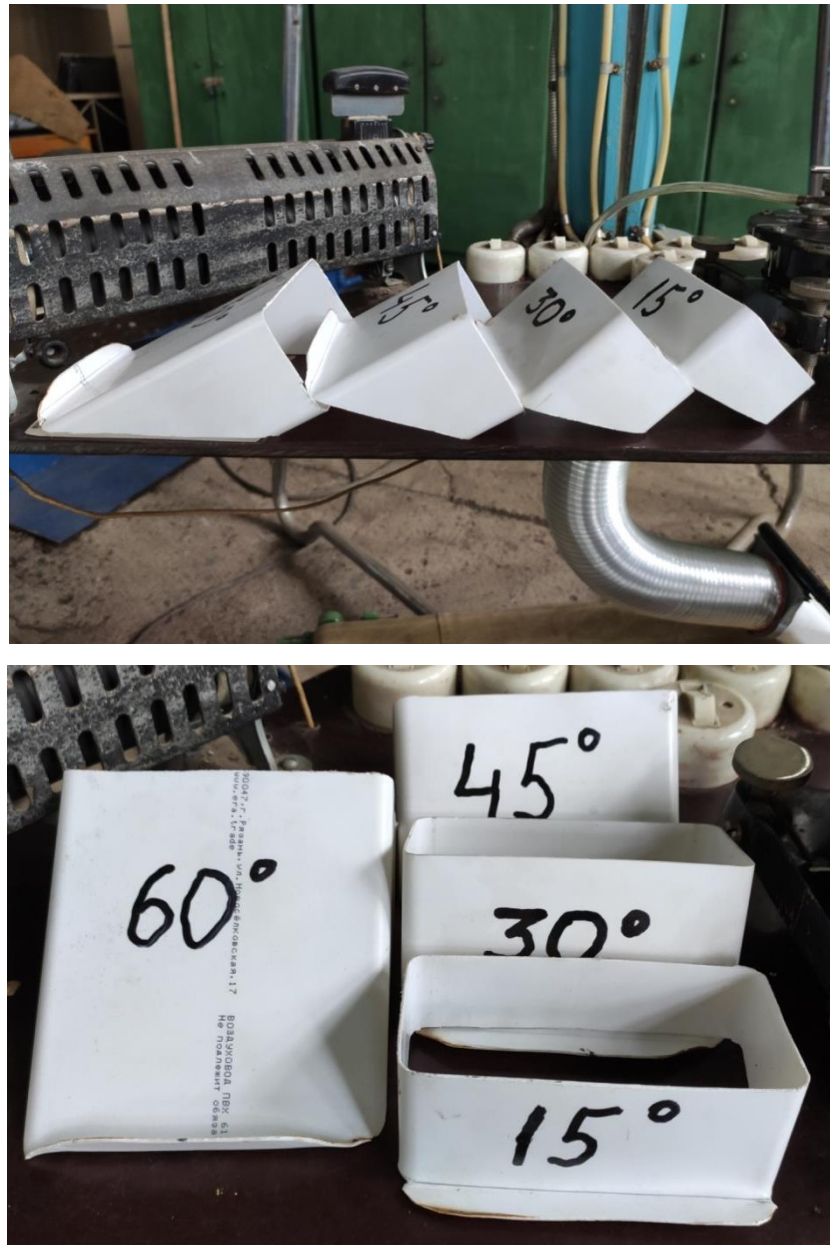


Рисунок 5.5 – Разработанные и изготовленные модели мундштуков
на всасывающее сопло

Все представленные на рисунке мундштуки поочередно устанавливались на всасывающее сопло лабораторной установки (см. п. 4.3), и по методикам, представленным ранее в п. 4.5, определялась скорость воздушного потока на расстоянии удаления от нижней кромки сопла и эффективность всасывания по максимальной длине оси всасывающего факела. В ходе опытов изменялся угол установки сопла α . Высота расположения сопла над поверхностью ленты принята постоянной – 25 мм.

5.3. Определение скорости воздушного потока по оси всасывающего факела при использовании мундштуков

Последовательная установка различных мундштуков на сопло представлена на рисунке 5.6.

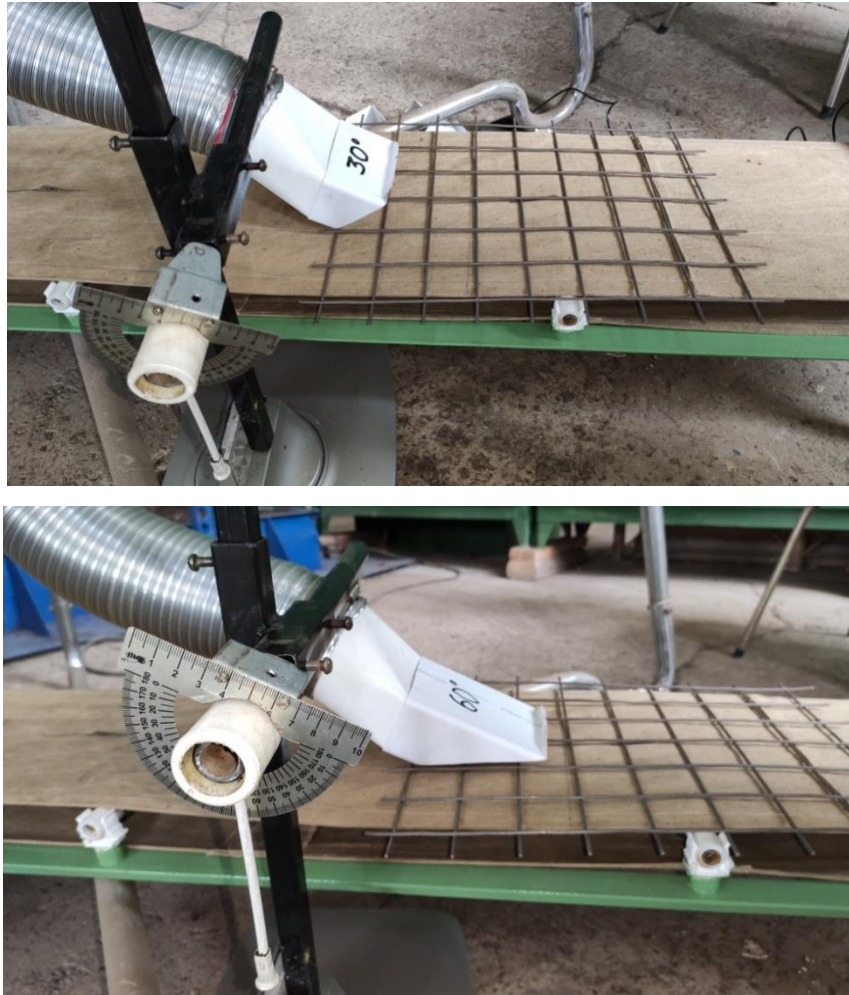


Рисунок 5.6 – Установка мундштуков на всасывающее сопло

Скорости воздушного потока, полученные в ходе эксперимента при изменении угла установки сопла и угла активации расстила приведены в таблице 5.1. Для сравнения в нее же добавлены параметры работы сопла без мундштука ($\beta = 0$). Жирным шрифтом выделены максимальные скорости воздушного потока в серии экспериментов. Графические зависимости, отражающие данные таблицы представлены на рисунках 5.7–5.14.

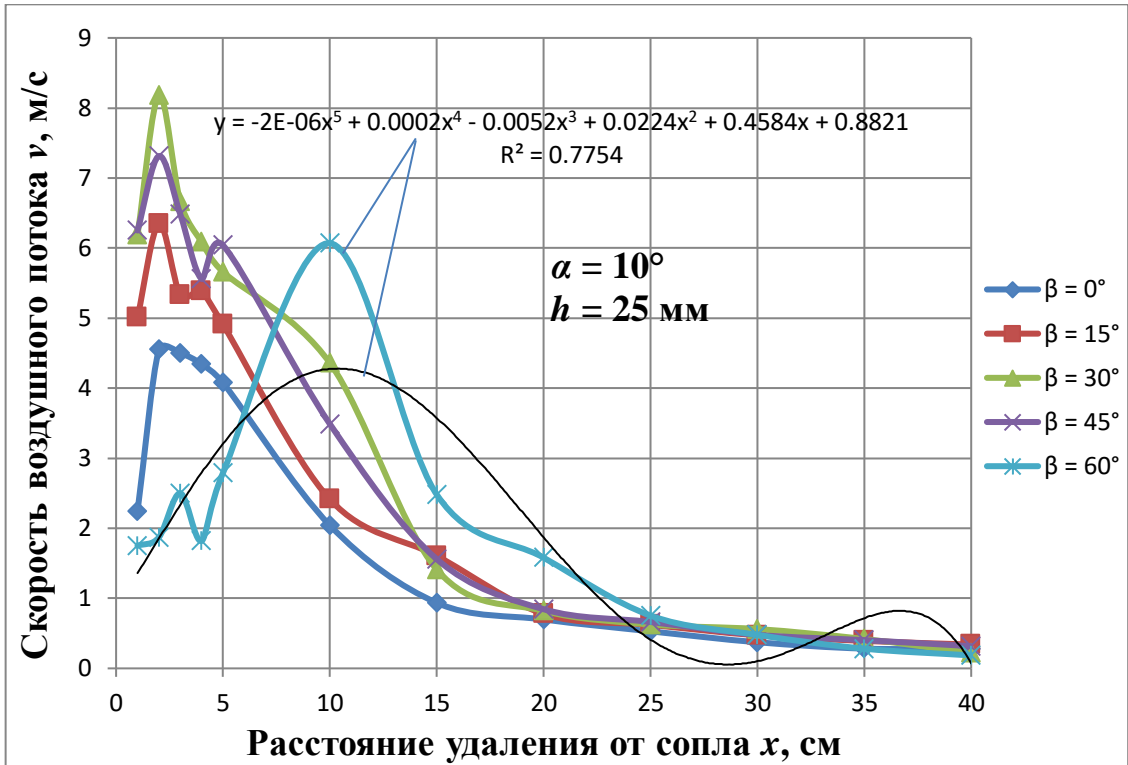


Рисунок 5.7 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до сопла x и угла активации расстила β при угле установки сопла $\alpha = 10^\circ$

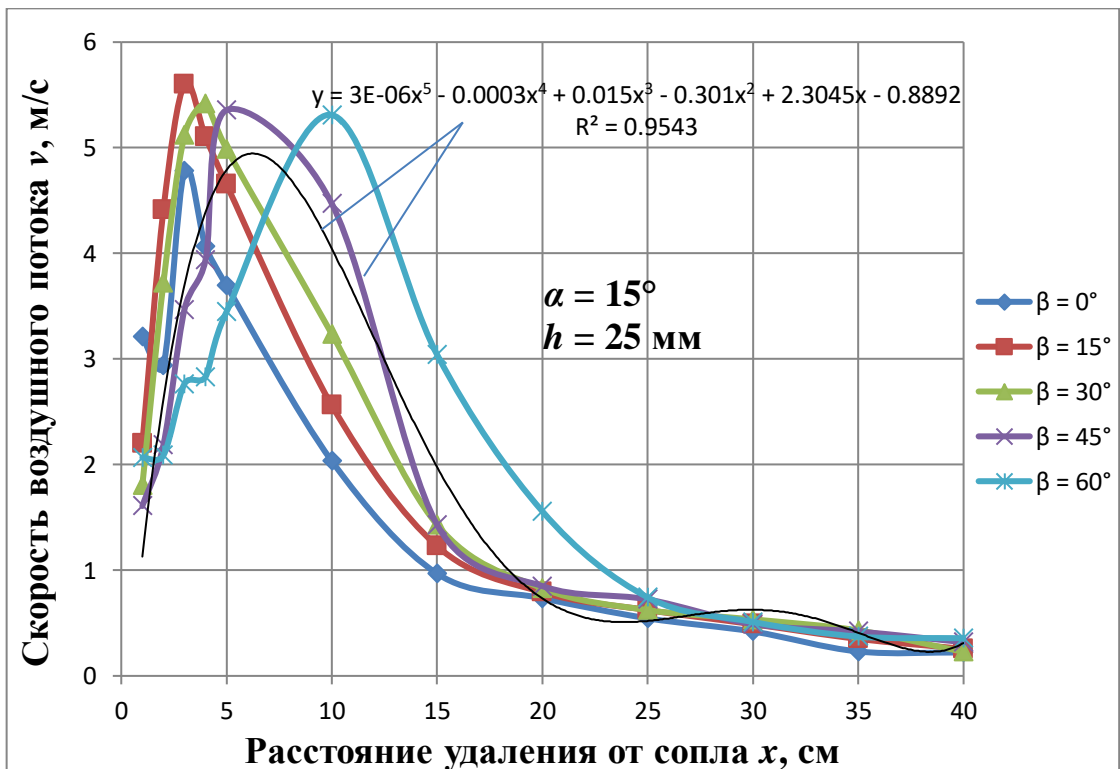


Рисунок 5.8 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до сопла x и угла активации расстила β при угле установки сопла $\alpha = 15^\circ$

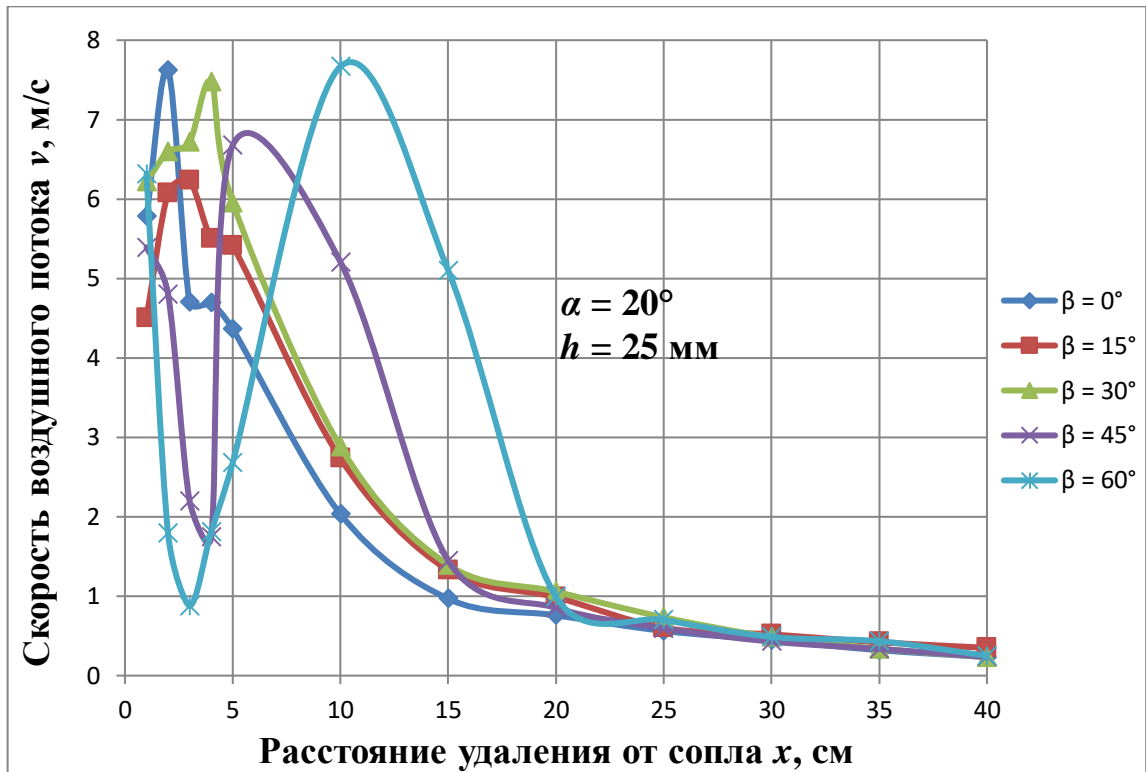


Рисунок 5.9 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до сопла x и угла активации расстила β при угле установки сопла $\alpha = 20^\circ$

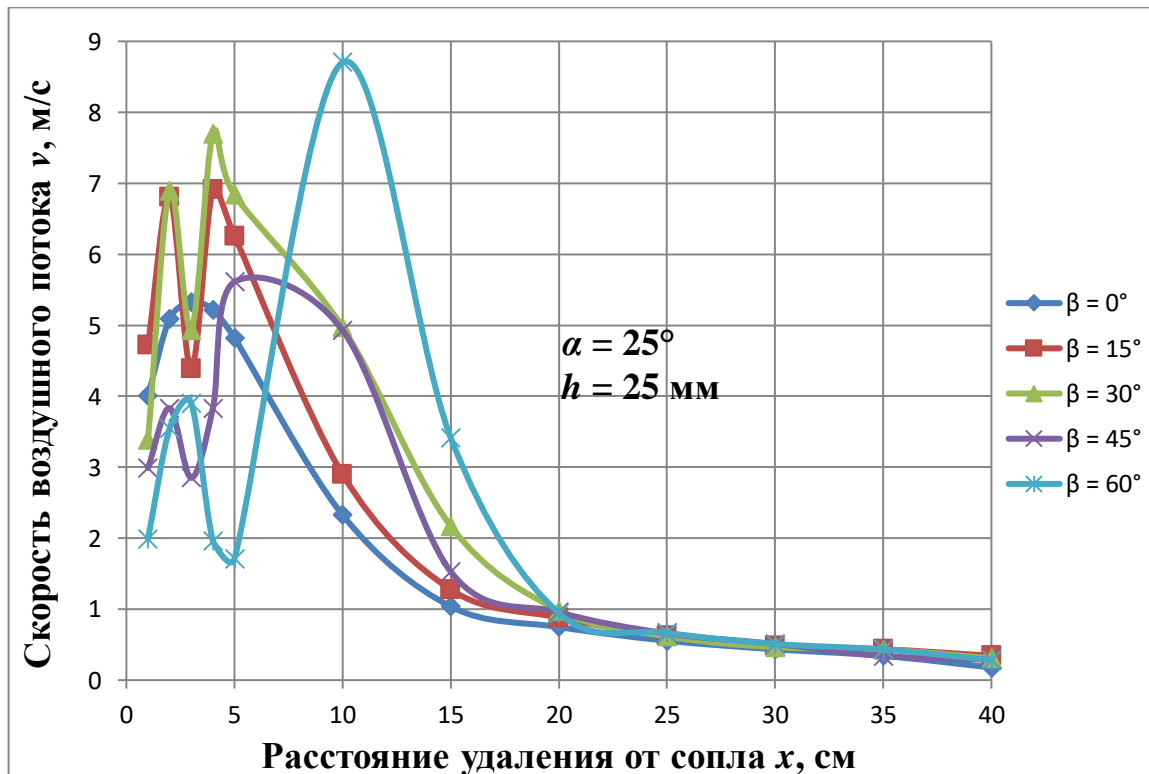


Рисунок 5.10 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до сопла x и угла активации расстила β при угле установки сопла $\alpha = 25^\circ$

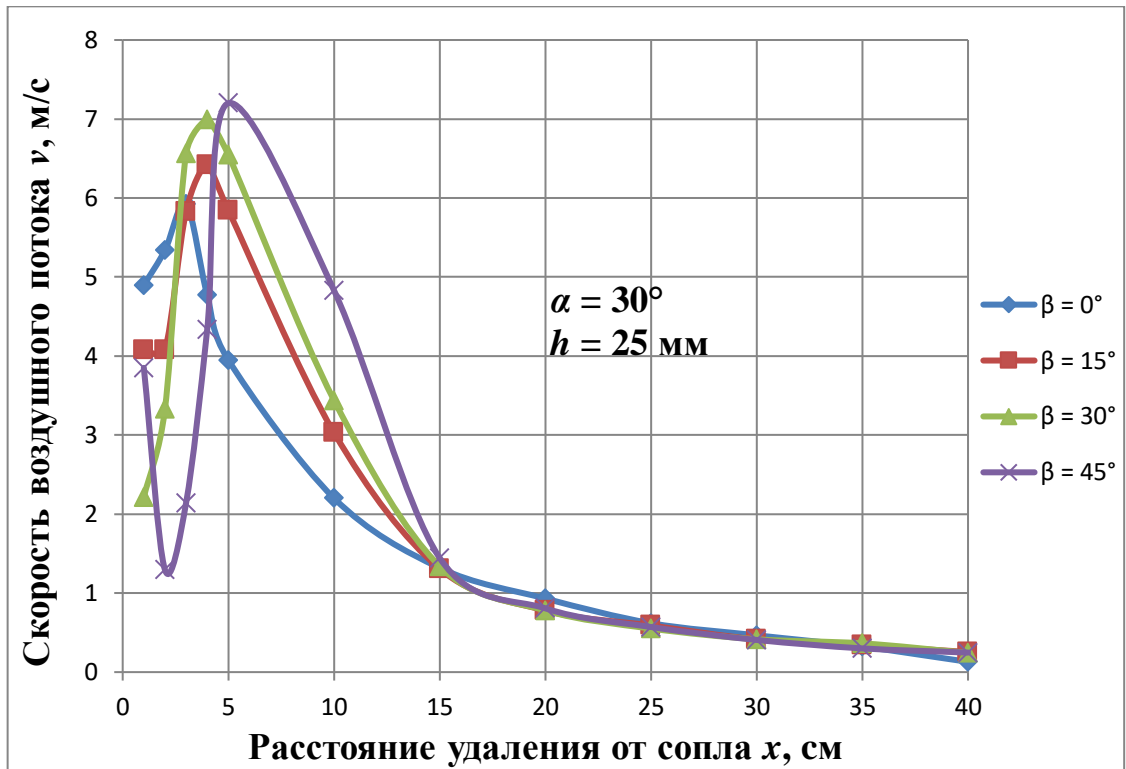


Рисунок 5.11 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до сопла x и угла активации расстила β при угле установки сопла $\alpha = 30^\circ$

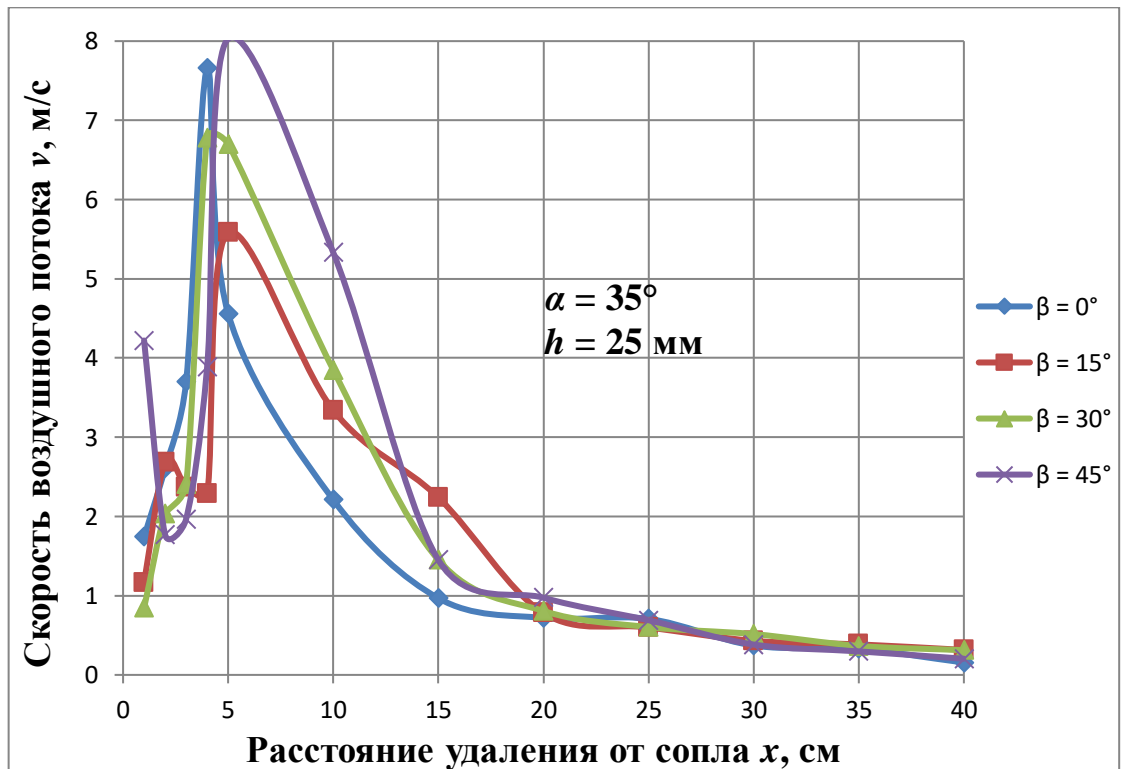


Рисунок 5.12 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до сопла x и угла активации расстила β при угле установки сопла $\alpha = 35^\circ$

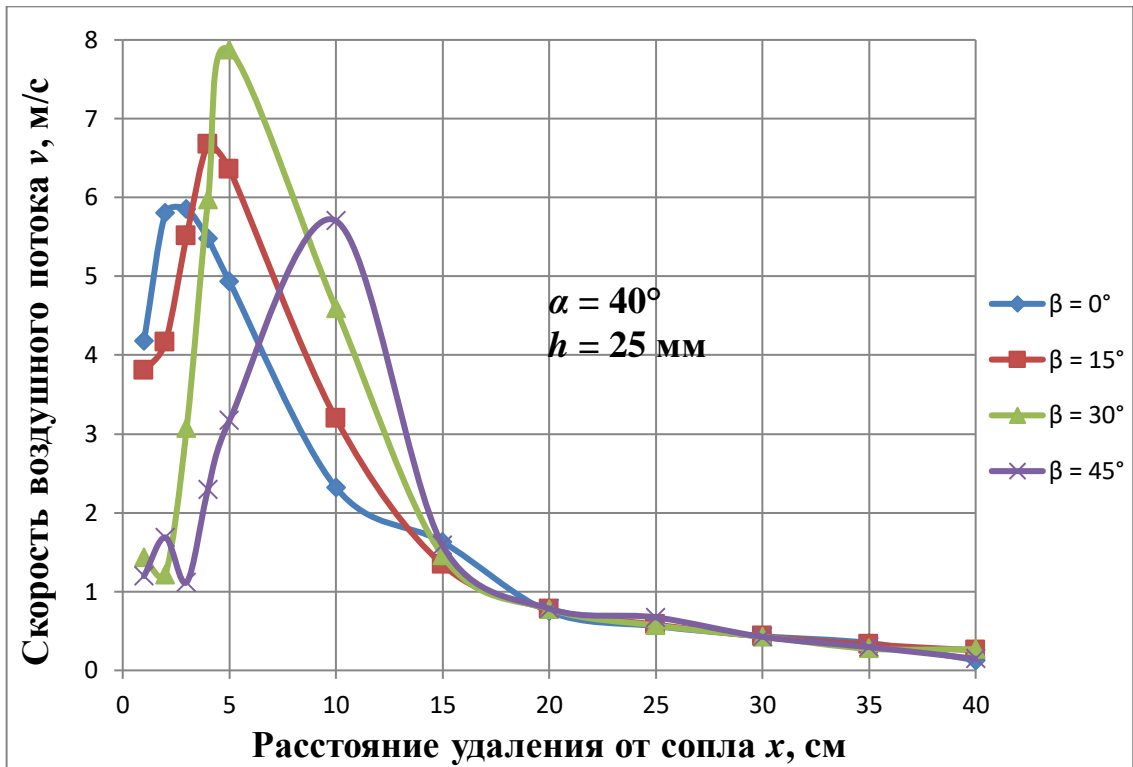


Рисунок 5.13 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до сопла x и угла активации расстила β при угле установки сопла $\alpha = 40^\circ$

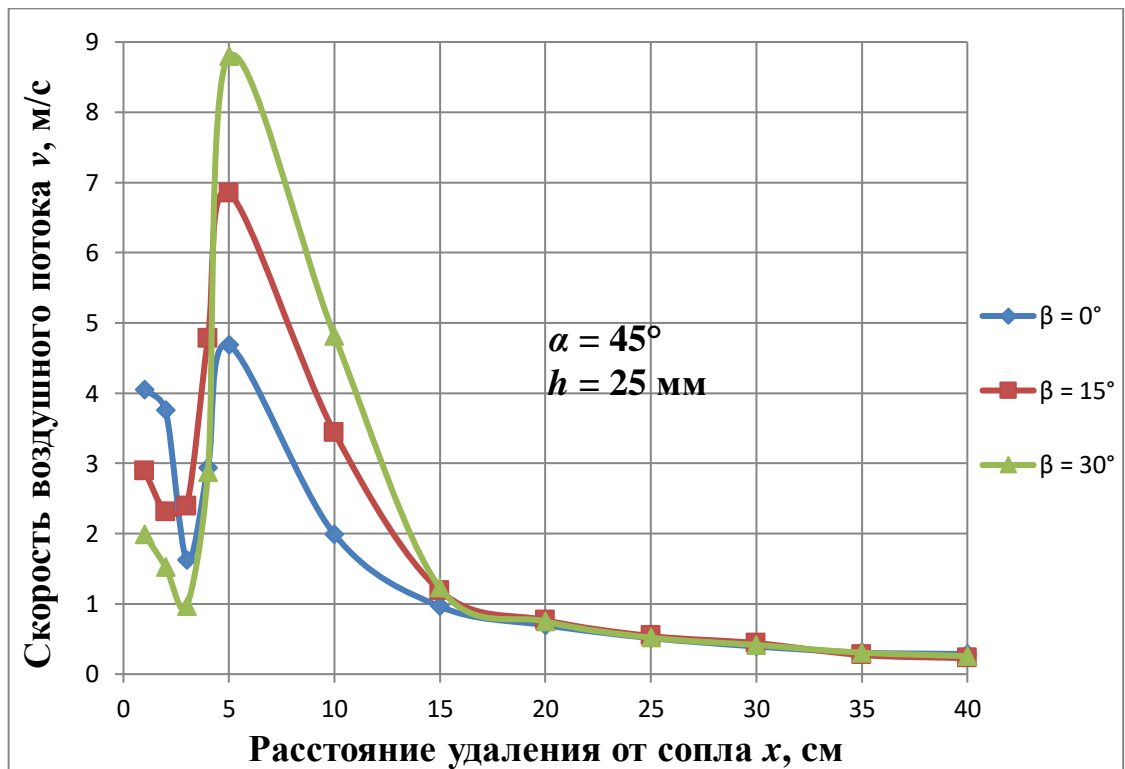


Рисунок 5.14 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до сопла x и угла активации расстила β при угле установки сопла $\alpha = 45^\circ$

Анализ данных таблицы 5.1 и графиков, изображенных на рисунках 5.7–5.14 позволяет сделать следующие выводы.

1. Практически во всех случаях скорость воздушного потока значительно (в 1,5–3 раза) понижается на расстоянии 10–15 см от нижнего края сопла. Скорость воздушного потока менее 1 м/с в подавляющем большинстве случаев наблюдается на расстоянии 20 см от нижнего края сопла. Закономерность уменьшения скорости воздушного потока на расстоянии 20–40 см от нижнего края сопла ввиду незначительности колебаний можно считать линейной.

2. Во всех исследованных случаях на графиках присутствуют характерные «пики», свидетельствующие о сильно выраженной турбулентности воздушного потока, причем речь здесь идет не только об изменении модуля, но и направления скорости. Более подробно поле скоростей всасывающего факела в векторной форме исследовано в работе [5].

3. Попытка аппроксимировать полученные кривые по критерию максимального коэффициента детерминации (R^2) привела к полиномиальной зависимости со степенью не менее 5 (рисунки 5.7, 5.8).

4. Наиболее сильные «пики» наблюдаются при угле атаки расстила θ , приближающемся к 90° , что реализуется одновременно углом установки сопла α и передним углом мундштука (углом активации расстила) β .

5. Понижение скорости воздушного потока на входе в сопло и при углах атаки расстила, близких к 90° , свидетельствует о перераспределении энергии в зоне всасывания: удельная кинетическая энергия воздушного потока понижается, а удельная потенциальная (энергия давления) – возрастает.

6. Вид всех представленных на графиках зависимостей по характеру и размаху колебаний скорости позволяет сделать вывод о более сильной турбулентности воздушного потока, чем в случае, когда высота сопла над поверхностью расстила равна нулю.

7. Выявлены точки максимальных значений скоростей воздушного потока, координаты которых в форме расстояния удаления от сопла x сведены в таблицу 5.2. По данным таблицы построен график (рисунок 5.15).

Таблица 5.2 – Зависимость расстояния удаления от сопла x , на котором наблюдается максимальная скорость воздушного потока, от угла установки сопла α и угла активации расстила β при высоте расположения сопла над подстилающей поверхностью 25 мм

$\beta, ^\circ$	Угол установки сопла α°							
	10	15	20	25	30	35	40	45
	Расстояние удаления от нижней кромки сопла x , на котором наблюдается максимальная скорость воздушного потока, см							
0	2	3	2	3	3	4	3	5
15	4	4	3	4	4	5	4	5
30	4	4	4	4	4	4	5	5
45	5	5	5	5	5	5	10	–
60	10	10	10	10	–	–	–	–

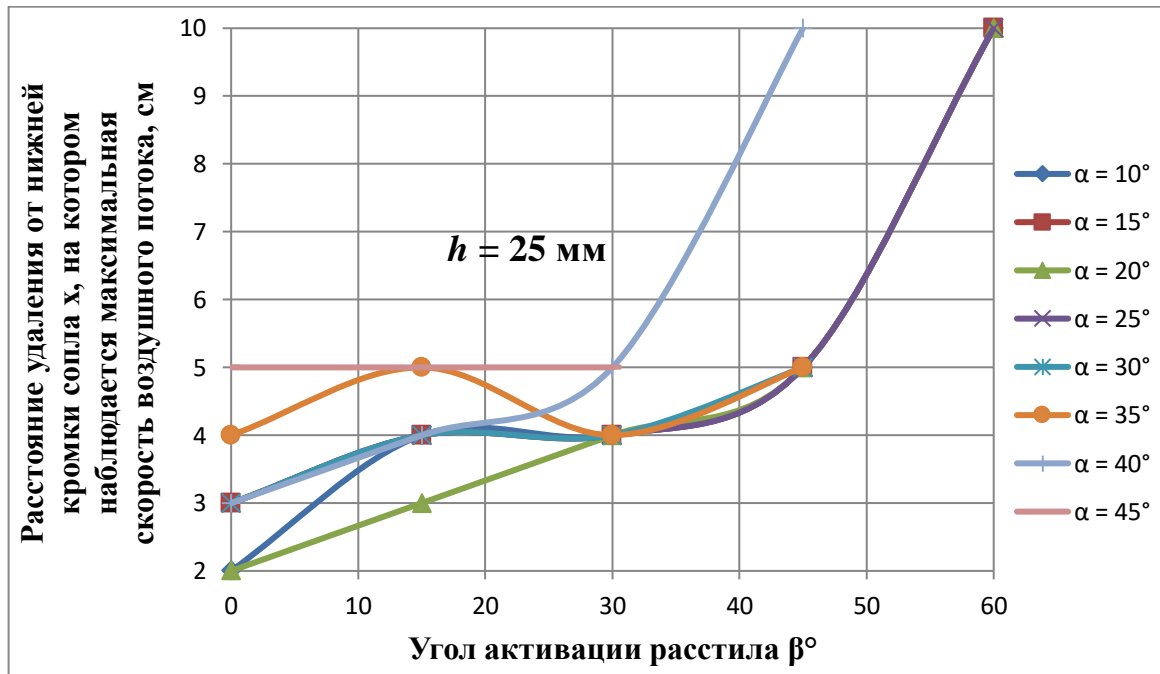


Рисунок 5.15 – Зависимость расстояния удаления от сопла x , на котором наблюдается максимальная скорость воздушного потока от угла установки сопла α и угла активации расстила β при высоте расположения сопла от подстилающей поверхности $h = 25$ мм

Анализ данных таблицы 5.2 позволяет сделать следующий вывод: характерные «пики» на графических зависимостях имеют достаточно четкую дислокацию и зависят от угла активации расстила. Так, для $\beta = 0^\circ$ (мундштук отсутствует), максимальные значения скоростей воздушного потока наблюдаются в основном на расстоянии $x = 2-4$ см; для $\beta = 15^\circ$ $x = 3-4$ см; для $\beta = 30^\circ$ $x = 4-5$ см; для $\beta = 45^\circ$ $x = 5-10$ см, для $\beta = 60^\circ$ $x = 10$ см.

5.4. Определение длины оси активной зоны всасывающего факела при использовании мундштуков

Для определения длины оси активной зоны всасывающего факела при использовании различных мундштуков было проведено экспериментальное исследование по оценке эффективности всасывания торфяной фрезерной крошки, методика которого подробно изложена в п. 4.5. Лабораторная установка включалась, реостатом устанавливалась скорость всасывания, близкая к полученной в полевых условиях на машине КТТ-2 (п. 3.3). Всасывающее сопло, установленное под определенными углами α поочередно снабжалось той или иной моделью мундштука, на конвейерную ленту установки помещались образцы торфяной крошки переходного и верхового видов торфа, конвейерная лента приводилась в движение. В момент страгивания с места частицы торфа для последующего разгона и отрыва от поверхности ленты производился замер расстояния от нижнего края сопла до точки страгивания частицы с места. Опыты повторялись по 6 раз. Результаты опытов для переходного и верхового видов торфа сведены в таблицу 5.3. Для сравнения в нее добавлен случай использования сопла без мундштука, когда угол активации расстила $\beta = 0$.

Графические зависимости, отражающие материалы таблицы 5.3 представлены на рисунках 5.16 и 5.17.

Таблица 5.3 – Зависимость длины оси активной зоны всасывающего факела от углов установки сопла и активации расстила при высоте расположения сопла над подстилающей поверхностью $h = 25$ мм

Угол активации расстила β , °	Длина оси активной зоны всасывающего факела, мм	
	Переходный торф $w = 48,45$ %; $R = 35-40$ %	Верховой торф $w = 44$ %; $R = 5-10$ %
Угол установки сопла $\alpha = 10^\circ$		
0	10	20
15	30	60
30	35	70
45	70	80
60	75	110
Угол установки сопла $\alpha = 15^\circ$		
0	20	40
15	40	65
30	60	75
45	80	95
60	110	120
Угол установки сопла $\alpha = 20^\circ$		
0	30	45
15	40	65
30	50	75
45	90	95
60	120	125
Угол установки сопла $\alpha = 25^\circ$		
0	40	65
15	45	80
30	50	95
45	80	110
60	120	140
Угол установки сопла $\alpha = 30^\circ$		
0	65	70
15	75	85
30	85	105
45	105	110
60	130	140
Угол установки сопла $\alpha = 35^\circ$		
0	60	65
15	70	75
30	90	100
45	105	115
60	–	–
Угол установки сопла $\alpha = 40^\circ$		
0	55	60
15	60	90
30	100	115
45	120	125
60	–	–
Угол установки сопла $\alpha = 45^\circ$		
0	40	55
15	80	90
30	100	110
45	115	120
60	–	–

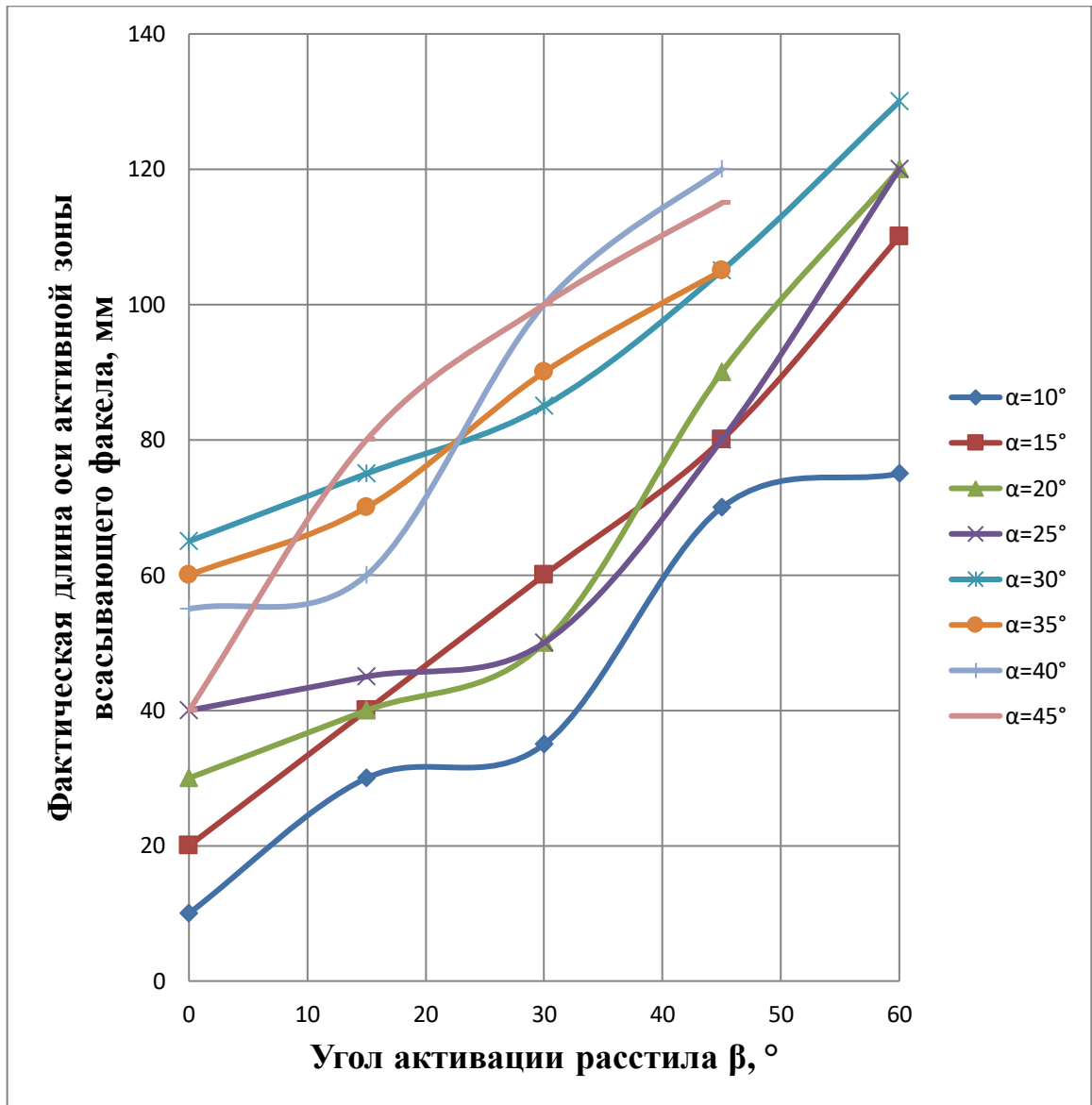


Рисунок 5.16 – Зависимость фактической длины оси активной зоны всасывающего факела от угла установки сопла α и переднего угла мундштука (угла активации расстила) β для переходного торфа $w = 48,45\%$; $R = 35-40\%$

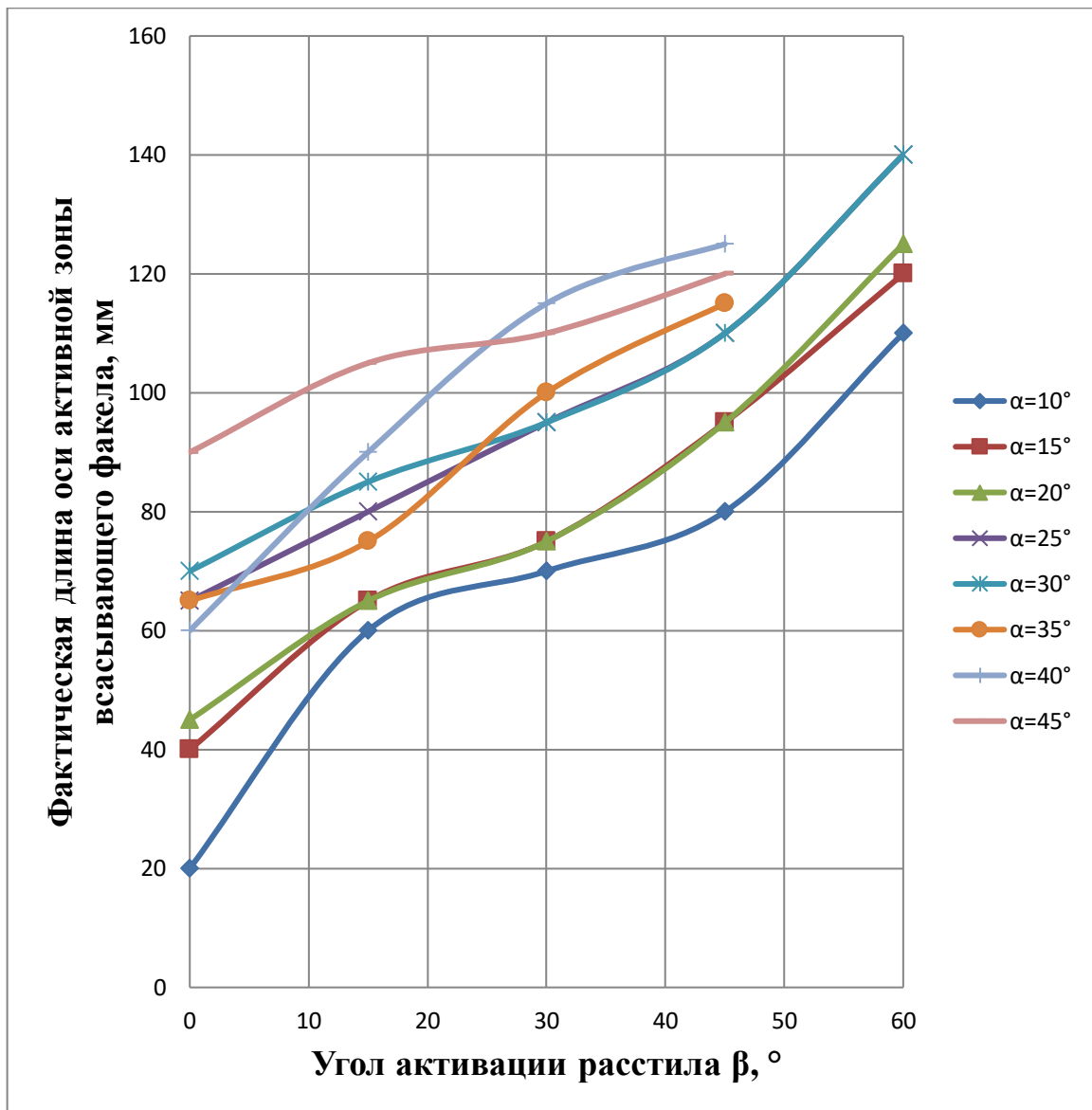


Рисунок 5.17 – Зависимость фактической длины оси активной зоны всасывающего факела от угла установки сопла α и переднего угла мундштука (угла активации расстила) β для верхового торфа $w = 44\%$; $R = 5\text{--}10\%$

Из всех полученных зависимостей (рисунки 5.16, 5.17) наиболее рациональными параметрами установки сопла и активации расстила можно считать те, которые обеспечивают наибольшую фактическую длину оси активной зоны всасывающего факела. Такими параметрами в случае, как с верховым, так и с переходным торфом являются: угол установки сопла $\alpha = 30^\circ$, угол активации расстила $\beta \rightarrow 60^\circ$. Следовательно, угол атаки расстила $\theta = \alpha + \beta \rightarrow 90^\circ$. Однако, тогда задний угол (рисунок 5.4) $\gamma \rightarrow 0^\circ$.

Технологически это невозможно, поскольку при работе машины, особенно при ее движении задним ходом на разворотах и прочем маневрировании высока вероятность повреждения мундштука с соплом вплоть до их отрыва из-за трения о подстилающую поверхность залежи. Поэтому очевидно, что задний угол должен быть отличен от нуля и принимать значение $0^\circ < \gamma \leq 5^\circ$. Тогда угол атаки расстила $85^\circ \leq \theta < 90^\circ$, что обеспечивается за счет угла установки сопла $\alpha = 30^\circ$ и угла активации расстила $55^\circ \leq \beta < 60^\circ$. Данные параметры следует считать рациональными [120].

В качестве сравнения эффективности всасывания соплом с рациональным углом установки $\alpha = 30^\circ$ фрезерной крошки из верхового и переходного торфа по материалам таблицы 5.4 построены графики, позволившие получить уравнения зависимости длины оси активной зоны всасывающего факела $L_{\text{фм}}$ (мм) от угла активации расстила β (рисунок 5.18). Определены также и коэффициенты детерминации R^2 .

Уравнения имеют следующий вид:

– для верхового торфа

$$L_{\text{фмв}} = 0,004\beta^2 + 0,814\beta + 71,14, \quad (5.1)$$

$$R^2 = 0,96.$$

– для переходного торфа:

$$L_{\text{фмп}} = 0,013\beta^2 + 0,304\beta + 65,71, \quad (5.2)$$

$$R^2 = 0,99.$$

Сравнение данных, приведенных на рисунках 4.11 и 5.18, а также в таблицах 4.3 и 5.3 дает возможность утверждать, что использование предложенной конструкции активизирующего мундштука более чем в два раза увеличивает длину оси активной зоны всасывающего факела, а, следовательно – и увеличит эффективность всасывания торфяными пневмоуборочными машинами.

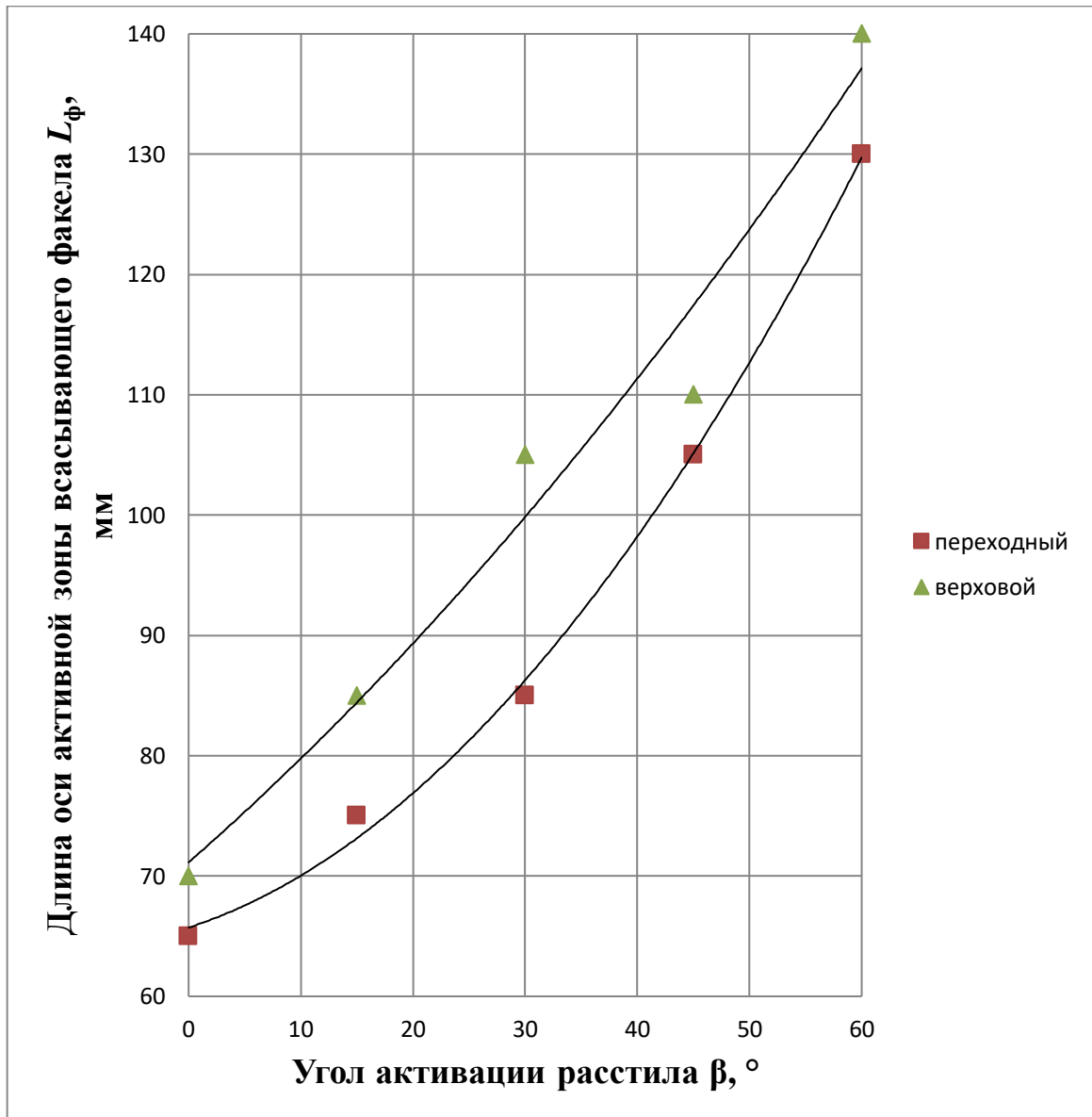


Рисунок 5.18 – Сравнение эффективности работы сопла, установленного под углом $\alpha = 30^\circ$ при всасывании верхового и переходного торфа и высоте расположения сопла от подстилающей поверхности $h = 25$ мм

Как видно из рисунка 5.18, фактическая длина оси активной зоны всасывающего факела при работе с рациональным углом установки сопла $\alpha = 30^\circ$ на верховом торфе всегда выше, чем на переходном на 5–23 %. Причем наибольшая разница между ними наблюдается при угле активации расстила $\beta = 30^\circ$.

5.5. О корреляционной связи длины оси активной зоны всасывающего факела и угла активации расстила

Близость форм кривых, полученных на рисунке 5.18 к линейной зависимости позволяет сделать предположение о тесной связи длины оси активной зоны всасывающего факела и угла активации расстила. Для проверки этого предположения был произведен корреляционный анализ [32] с расчетом коэффициентов корреляции:

$$r_{L_\phi\beta} = \frac{\Sigma(\beta - \bar{\beta})(L_\phi - \bar{L}_\phi)}{\sqrt{\Sigma(\beta - \bar{\beta})^2 \Sigma(L_\phi - \bar{L}_\phi)^2}}, \quad (5.3)$$

где β и L_ϕ – точечные значения угла активации расстила и длины оси активной зоны всасывающего факела; $\bar{\beta}$ и \bar{L}_ϕ – их средние значения в объеме выборки из $n = 5$ серий опытов.

Ошибка коэффициента корреляции при числе опытов $n < 100$:

$$m_r = \sqrt{\frac{(1 - r_{L_\phi\beta}^2)}{f}}, \quad (5.4)$$

где $f = n - 2$ – число степеней свободы.

Коэффициент корреляции является значимым в 1-м приближении, если

$$t_r = \frac{|r_{L_\phi\beta}|}{m_r} > 3. \quad (5.5)$$

Более строгое заключение о значимости коэффициента корреляции получено путем его сравнения с критическим $r_{кр}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 3$ ($r_{кр} = 0,88$) [32].

Все расчеты сведены в таблицу 5.4.

Рассчитанные коэффициенты корреляции в обоих случаях (для верхового и переходного торфа) при $|r| > 0,9$ говорят – о практически функциональной связи [121] между длиной оси активной зоны всасывающего факела и углом активации расстила.

Таблица 5.4 – Расчет коэффициентов корреляции между углом активации расстила β и длиной оси активной зоны всасывающего факела L_ϕ при всасывании фрезерной крошки из верхового и переходного видов торфа

$\beta, ^\circ$	$L_\phi, \text{мм}$	$\beta - \bar{\beta}$	$L_\phi - \bar{L}_\phi$	$(\beta - \bar{\beta})^2$	$(L_\phi - \bar{L}_\phi)^2$	$(\beta - \bar{\beta}) \times (L_\phi - \bar{L}_\phi)$
Торф верховой, $R = 5-10 \%$; $w = 44 \%$						
0	70	-30	-32	900	1024	960
15	85	-15	-17	225	289	255
30	105	0	3	0	9	0
45	110	15	8	225	64	120
60	140	30	38	900	1444	1140
$\Sigma \beta = 150^\circ$; $\bar{\beta} = 30^\circ$	$\Sigma L_\phi = 510$ мм; $\bar{L}_\phi = 102$ мм			$\Sigma(\beta - \bar{\beta})^2 = 2250$	$\Sigma(L_\phi - \bar{L}_\phi)^2 = 2830$	$\Sigma(\beta - \bar{\beta}) \times (L_\phi - \bar{L}_\phi) = 2475$
$r_{L_\phi\beta} = \frac{2475}{\sqrt{2250 \cdot 2830}} = 0,981$; $m_r = \sqrt{\frac{(1-0,988^2)}{5-2}} = 0,0893$; $t_r = \frac{ 0,988 }{0,0893} = 11,064$; $r_{кр} = 0,88$						
Торф переходный, $R = 35-40 \%$; $w = 48,45 \%$						
0	65	-30	-27	900	729	810
15	75	-15	-17	225	289	255
30	85	0	-7	0	49	0
45	105	15	3	225	9	45
60	130	30	38	900	1444	1140
$\Sigma \beta = 150^\circ$; $\bar{\beta} = 30^\circ$	$\Sigma L_\phi = 460$ мм; $\bar{L}_\phi = 92$ мм			$\Sigma(\beta - \bar{\beta})^2 = 2250$	$\Sigma(L_\phi - \bar{L}_\phi)^2 = 2520$	$\Sigma(\beta - \bar{\beta}) \times (L_\phi - \bar{L}_\phi) = 2250$
$r_{L_\phi\beta} = \frac{2250}{\sqrt{2250 \cdot 2520}} = 0,945$; $m_r = \sqrt{\frac{(1-0,945^2)}{5-2}} = 0,189$; $t_r = \frac{ 0,945 }{0,189} = 5$; $r_{кр} = 0,88$						

Таким образом, зная один из параметров и воспользовавшись вышеприведенными математическим моделями (5.1) и (5.2), можно с высокой вероятностью определить другой параметр, что является весьма

полезным и актуальным при ограниченности времени. Кроме того, в результате корреляционного анализа была выявлена практически функциональная связь между длиной оси активной зоны всасывающего факела и углом активации расстила.

5.6. Выводы по главе 5

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. При исследовании скорости воздушного потока по оси всасывающего факела отмечено, что наиболее сильные «пики», свидетельствующие о сильной турбулентности потока, наблюдаются при угле атаки расстила θ , приближающемся к 90° , что реализуется одновременно углом установки сопла α и передним углом мундштука (углом активации расстила) β .

2. Предложенные формы мундштуков позволяют увеличить интенсивность всасывания по критерию максимальной длины оси активной зоны всасывающего факела. Наибольшей эффективностью всасывания отличается система с углом установки сопла $\alpha = 30^\circ$, углом активации расстила $55^\circ \leq \beta < 60^\circ$ и углом атаки расстила $85^\circ \leq \theta < 90^\circ$.

3. Для условий всасывания фрезерной торфяной крошки из верхового и переходного вида торфа и установки сопла под рациональным углом всасывания $\alpha = 30^\circ$ и получены математические модели, позволяющие определить длину оси эффективной зоны всасывающего факела в зависимости от угла активации расстила.

4. Проведенный корреляционный анализ позволил сделать вывод о тесной, практически функциональной связи между длиной оси активной зоны всасывающего факела и углом активации расстила.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Таким образом, в диссертации решена научная задача, имеющая значение для развития знаний в области создания и эксплуатации машин для пневматической уборки фрезерного торфа, соответствующая п. 3. паспорта научной специальности 05.05.06 «Горные машины», заключающаяся в обосновании рациональных параметров всасывающего сопла и конструктивных параметров мундштука, способного повысить эффективность всасывания путем изменения направленности и интенсивности воздушного потока.

Основные результаты диссертации следующие.

1. Установлено, что причиной отрыва частиц от подстилающей поверхности является не сила Магнуса, а подъемная сила, обусловленная разностью давлений.

2. Получен патент на изобретение лабораторной установки для исследования работы всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины, позволяющая испытывать модели сопел с углами установки $0-90^\circ$ к поверхности расстила, обеспечивая высоту сопла $0-200$ мм.

3. Проведены экспериментальные лабораторные исследования по оценке эффективности всасывания торфяных частиц фрезерной крошки максимальным кондиционным размером 25 мм из верхового и переходного торфа при различных углах установки сопла. Отмечено, что по критерию максимальной длины оси активной зоны всасывающего факела, рациональными параметрами являются угол установки сопла – $30-35^\circ$, и высота расположения сопла над подстилающей поверхностью – 25 мм. Получены математические модели, описывающие зависимость фактической длины оси активной зоны всасывающего факела от угла установки.

4. Разработаны и созданы модели мундштуков на всасывающее сопло. Данные насадки позволяют повысить эффективность всасывания путем

придания жесткой направленности воздушному потоку, не изменяя скорость всасывания на входе в сопло. Введен термин – «угол активации расстила».

5. Обоснованы рациональные параметры мундштука на сопло по критерию максимальной длины оси активной зоны всасывающего факела. С учетом необходимого заднего угла 5° , угол атаки расстила должен составлять 85° . При условии соблюдения рационального угла установки сопла $30\text{--}35^\circ$, рациональный угол активации расстила должен составлять $50\text{--}55^\circ$. Отмечено, что применение предложенного активизирующего мундштука способно увеличить более, чем в два раза длину оси активной зоны всасывающего факела, а, следовательно – и повысить эффективность всасывания пневмоуборочными машинами из-за увеличения времени воздействия воздушного потока на торфяную фрезерную крошку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кислов Н.В., Бакшанский В.И., Вакунов В.М. Основы пневмотранспорта сыпучих торфяных сред. Мн.: Наука и техника. 1981. 182 с.
2. Антонов В.Я., Копенкин В.Д. Технология и комплексная механизация торфяного производства. М.: Недра, 1983. 287 с.
3. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В, Самсонов Л.Н. Развитие техники пневматической уборки фрезерного торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2006. № 1. С. 317–321.
4. Blaess V. Die Stromung in Rohen und die Berechnung weitverzweister Leitungen und Kanale. Berlin, 1911. 139 p.
5. Карг Г.Р. Промышленная вентиляция. Пневматический транспорт материалов. М.: ГТИ, 1930. 40 с.
6. Жоховский В.П. Расчет пневматического транспорта лужги. Маслобойно-жировое дело, 1930. № 3 С. 12–17.
7. Кольчев В.И. Механизация транспорта массовых грузов в сельском хозяйстве. М.-Л.: Сельхозгиз, 1936. 401 с.
8. Gutzeit H. Probleme des Transportes von Festteilchen ib Gasen. Leipzig: Jahrbuch der Müllerei, 1951. pp. 34–39.
9. Козьмин П.С. Машины непрерывного транспорта, ч. 3. Л.-М.: ОНТИ, 1936. 271 с.
10. Barth W. Physikalische und wirtschaftliche Probleme des Transportes von Festteilchen in Flüssigkeiten und Gasen // Chemie-Ingenieur-Technik, 1958. № 3, pp. 171–180.
11. Barth W. Physikalische und wirtschaftliche Probleme des Transportes von Festteilchen in Flüssigkeiten und Gasen // Chemie-Ingenieur-Technik, 1960. № 3, pp. 164–171.
12. Дзядзио А.М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Заготиздат, 1961. 328 с.

13. Дзядзио А.М., Кеммер А.С. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1967. 295 с.

14. Кенигсман Ф. Мельничные пневматические транспортные установки и их элементы // В кн.: Мельничный пневматический транспорт за рубежом, вып. 1. М.: Хлебиздат, 1956. С. 17–26.

15. Смолдырев А.Е. Гидравлический и пневматический транспорт на угольных предприятиях. М.: Углетехиздат, 1956. 291 с.

16. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт. М.: Metallurgia, 1975. 384 с.

17. Урбан Я. Пневматический транспорт. М.: Машиностроение, 1967. 256 с.

18. Броунштейн Б.И., Тодес О.М. Основы теории пневматического транспорта // Журнал технической физики, 1953. Т. 23, вып. 1. С. 110–126.

19. Тодес О.М. Основные проблемы адсорбции и катализа на движущемся и взвешенном слое. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 100 с.

20. Успенский В.А. Пневматический транспорт материалов во взвешенном состоянии. Свердловск: Metallurgizdat, 1952. 212 с.

21. Успенский В.А. Пневматический транспорт. Свердловск: Metallurgizdat, 1959. 232 с.

22. Клячко Л.С. Пневматический транспорт на деревообделочных предприятиях и нагнетательно-пневматической установки. Л.: Кубуч, 1931. 56 с.

23. Часс С.И. Исследование процесса пневматического транспортирования продуктов обогащения асбеста: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1969. 21 с.

24. Калинушкин М.П. Пневматический транспорт: Влияние механических примесей к воздуху на потери в трубопроводе. Тр. ЦАГИ, 1936, вып. 226. 54 с.

25. Горцакалян Л.О. Исследование процесса транспортирования фрезерного торфа пневматическим способом: Дис. канд.техн. наук. М., 1961. 159 с.
26. Солопов С.Г., Горцакалян Л.О., Самсонов Л.Н. Торфяные машины и комплексы. М.: Недра, 1973. 392 с.
27. Ильин В.Я. Исследование процесса транспортирования фрезерного торфа пневматическим способом с различными концентрациями аэросмеси: Дис. канд. техн. наук. Калинин, 1973. 247 с.
28. Орловский Э.Р. Выбор некоторых расчетных величин при проектировании установок пневмотранспорта // Тр. Ростов. Инженерно-строительного ин-та, 1957, вып. 9, С. 52–69.
29. Петренко С.М., Березовский Н.И. Влияние режимных параметров вертикального пневмотранспорта измельченного торфа на относительное скольжение воздушной и твердой фаз // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки», 2020. № 3(7). С. 50–57. DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-50-57.
30. Кислов Н.В. Физические и аэродинамические свойства измельченного торфа. Минск: Вышэйшая школа, 1967. 146 с.
31. Опейко Ф.А. Оценка интенсивности перемешивания жидкостей в химических реакторах // Тр. ЛенНИИХиммаша, 1965, т. 49. С. 69–76.
32. Пономарев В.М. Исследование сопротивления плавных и сегментных отводов при пневматическом транспортировании фрезерного торфа с малой и высокой концентрациями аэросмеси: Автореф. дис. канд. техн. наук. Калинин, 1967. 22 с.
33. Савицкий В.П. Исследование сопротивления движению торфо-воздушной смеси в поворотах трубопроводов: Автореф. дис. канд. техн. наук. Минск, 1972. 17 с.
34. Горцакалян Л.О., Жилин Д.Н., Ильин В.Я. Пневматический транспорт фрезерного торфа с высокой весовой концентрацией аэросмеси // Тр. Калинин. политехн. ин-та, 1969, вып. 4(17), С. 188–192.

35. Чарнко Е.В. Испытание пневматических машин по транспорту фрезерного торфа // Торфяное дело, 1930. № 1. С. 21–27
36. Давыдов Л.Р., Селеннов В.Г. О пневматической уборке фрезерного торфа // Торф и бизнес, 2008. № 4(14). С. 24–28.
37. Лазарев А.В., Корчунов С.С. и др. Справочник по торфу. М.: Недра, 1982. 760 с.
38. Солопов С.Г., Горцакалян Л.О., Самсонов Н.Л., Цветков В.И. Торфяные машины и комплексы. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1981. 416 с.
39. Делегация НП «Российское торфяное общество» посетило Канаду // Торф и бизнес, 2008. №3(13) 2008. С. 2–4.
40. URL: <https://www.ptchronos.com/ru-ru/пппродукция/peat-moss-field-equipment/peat-harvesting> (дата обращения: 21.01.2020)
41. URL: <http://kruviks.ee/services.html#3> (дата обращения 21.01.2020)
42. URL: https://energobelarus.by/market/catalog/mashina_pnevmotorfouborochnaya_mptu_30/ (дата обращения 21.01.2020).
43. URL: https://peat-machine.at.ua/index/pnevmaticheskij_kombajn_jik_40df/0-25 (дата обращения 19.02.2020)
44. Столбикова Г.Е., Иванов В.А., Королев И.О. Инновационный подход к увеличению сборов и снижению выбросов торфа при уборке пневматическим способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал), 2016. № 10. С. 105–110.
45. Опейко Ф.А. Степень переработки торфа в перерабатывающих и формующих машинах// В кн. «Сборник научных трудов», вып. 1. Мн.: Изд. АН БССР, 1951. С. 46– 52
46. Опейко Ф.А. Механизация и автоматизация торфяного производства. Минск: Высшая школа, 1963. 148 с.

47. Афанасьев А.М., Потапов В.Я., Александрова Е.И. Анализ закономерностей разделения минералов на полке фрикционного сепаратора // Математическое моделирование механических явлений: мат-лы Всеросс. научно-техн. конф. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. С. 47–53.

48. Анохин П.М., Потапов В.Я., Потапов В.В., Степаненков Д.Д. Выбор информативных признаков для разделения асбестовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал), 2017. № 4. С. 53–64.

49. Потапов В.Я., Макаров В.Н., Анохин П.М., Потапов В.В. и др. Изучение аэродинамических характеристик частиц, обладающих парусностью с целью создания пневмотранспортных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал), 2017. № 5. С. 52–56.

50. Потапов В.Я., Потапов В.В., Анохин П.М., Степаненков Д.Д. Определение коэффициентов трения и восстановления сыпучих материалов для проектирования аппаратов // Мат-лы научно-техн. конф. «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья». Екатеринбург: УГГУ, 2015. С. 176–183.

51. Потапов В.Я., Потапов В.В., Анохин П.М., Баранов И.М., Викулов Е.А. Разработка аэродинамических активных фрикционных сепараторов // Мат-лы научно-техн. конф. «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья». Екатеринбург: УГГУ, 2015. С. 218–225.

52. Потапов В.Я., Потапов В.В., Костюк П.А., Анохин П.М., Семенов А.В. Использование пневматических устройств для транспортировки сыпучих смесей после предварительного разделения материалов // Мат-лы научно-техн. конф. «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья». Екатеринбург: УГГУ, 2015. С. 229–232.

53. Потапов В.Я., Потапов В.В., Ляпцев С.А., Семериков Л.А., Анохин П.М. Конструкционное моделирование сепаратора для разделения руд по

трению и упругости // В сб. «Математическое моделирование механических явлений». Екатеринбург: УГГУ, 2015. С. 51–57.

54. Потапов В.Я., Потапов В.В., Анохин П.М., Степаненков Д.Д. Формирование разделительных поверхностей на основе исследования композитных материалов // В сб. «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». Мат-лы XIV Междун. научно-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека» в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург: УГГУ, 2016. С. 419–422.

55. Потапов В.Я., Потапов В.В., Семериков Л.А., Анохин П.М. Результаты разделений асбестосодержащих руд на магнитно-фрикционных аппаратах // В сб. «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». Мат-лы XIII Междун. научно-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека» в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург: УГГУ, 2015. С. 195–199.

56. Анохин П.М. Обоснование параметров аэродинамически активных фрикционных сепараторов для разделения асбестосодержащих руд. Дис. канд. техн. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2018. 163 с.

57. Тимухин С.А., Копачев В.Ф., Каргин И.В. Основы теории аэродинамического расчета шахтных осерадиальных вентиляторов // Изв. вузов. Горный журнал, 2010. № 8. С. 107–110.

58. Тимухин С.А., Копачев В.Ф., Лысенко С.В. О разработке типоразмерного ряда шахтных подземных осерадиальных вентиляторов // Изв. вузов. Горный журнал, 2010. № 7. С. 97–100.

59. Тимухин С.А., Копачев В.Ф., Тимухин А.С. Обоснование нормативных сроков службы вентиляторов главного проветривания // Известия вузов. Горный журнал, 2009. № 6. С. 71–73.

60. Тимухин С.А., Макаров Н.В., Копачев В.Ф. Исследование эффективности меридионального энергетического направляющего

аппарата // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал), 2009. № 9. С. 368–371.

61. Тимухин С.А., Макаров Н.В., Копачев В.Ф. Особенности аэродинамического расчета энергетического направляющего аппарата шахтного радиального вентилятора // Известия вузов. Горный журнал, 2006. № 6. С. 93–96.

62. Тимухин С.А., Копачев В.Ф., Шантарин С.С. Проблемы оптимизации параметров шахтных вентиляторов смешанного принципа действия по критерию энергозатрат // Известия вузов. Горный журнал, 2001. № 12. С. 54–59.

63. Копачев В.Ф. Обоснование и выбор рациональных схемных решений комплексов шахтных вентиляторных установок: Автореф. дис. д-ра техн. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2020. 33 с.

64. Самсонов Л.Н., Сеницын В.Ф. Торфяные машины и комплексы. Ч. 3. Тверь: ТГТУ, 2001. 140 с.

65. Пат. РФ № 2502661 МПК В65G 53/00. Способ вакуумно-пневматического транспортирования сыпучих материалов с высокой массовой концентрацией. Заявка № 2012136492/11: заявл. 27.08.2012 / Абрамов Я.К., Веселов В.М., Залевский В.М., Тамурка В.Г., Володин В.С., Гукасов Н.А., Дворяников В.Н.; заявитель Закрытое акционерное общество "Твин Трейдинг Компани".

66. Пат. РФ № 2535821 МПК В65G 53/24. Вакуумно-пневматическое устройство для транспортирования сыпучих материалов с высокой массовой концентрацией. Заявка № 2013148616/11: заявл. 31.10.2013 / Абрамов Я.К., Веселов В.М., Залевский В.М., Тамурка В.Г., Володин В.С., Гукасов Н.А., Севостьянов Ф.М., Дворяников В.Н.; заявитель Закрытое акционерное общество "Твин Трейдинг Компани".

67. Горцакалян Л.О., Чернышев В.В. Исследование скоростного поля всасывающего, нагнетательного и всасывающе-нагнетательного факелов активного сопла пневмоуборочной машины // Технология и комплексная

механизация торфяного производства: межвузовский тематический сборник. Калинин: КПИ, 1977. С. 28–32.

68. Горцакалян Л.О. Влияние поступательной скорости пневмоуборочной машины на изменение концентрации аэросмеси // Механизация процессов добычи и переработки торфа: труды Калининского политехнического института. М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1974. С. 20–24.

69. Соболев А.А., Мельник П.А., Тютюнник А.О. Движение частиц в воздушном потоке // Вектор науки ТГУ, 2011. № 3(17). С. 82–86.

70. Солопов С.Г., Горцакалян С.Г., Чернышев В.В. Определение минимальной скорости воздушного потока на входе во всасывающее сопло пневмоуборочной машины // Механизация добычи торфа: сб. научн. тр. М.: Недра, 1974. вып. XVII (XIII). С. 5–9.

71. Горцакалян Л.О. Влияние характеристик вентилятора и пневмосистемы пневмоуборочной машины на скорость входа потока в сопло и концентрацию аэросмеси // Механизация процессов добычи и переработки торфа: труды Калининского политехнического института. М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1974. С. 24–32.

72. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М., Андрианова А.А. Экспериментальное определение скорости витания торфяных частиц в пневмотранспортных установках // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: мат-лы Междун. конф. под общ. ред. Р.А. Ковалева (Тула, 30–31 октября 2018 г.). Тула: ТулГУ, 2018. С. 117–124.

73. Соловьев К.Н., Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование зависимости параметров витания частиц торфа в пневмотранспортных устройствах от качественной характеристики фрезерной крошки // Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России: мат-лы Междун. научно-практ. конф. (Тверь, 17–19 сентября 2018 г.). Тверь: ТвГТУ. С. 137–141.

74. Горцакалян Л.О. Расчетная или приведенная скорость витания фрезерного торфа // Технология и комплексная механизация торфяного производства: межвузовский тематический сборник. Калинин: КПИ, 1977. С. 24–28.

75. Солопов С.Г., Горцакалян Л.О. Вопросы пневмотранспорта фрезерного торфа в горизонтальных трубах // Торфяная промышленность, 1961. № 6. С. 6–10.

76. Горцакалян Л.О. О коэффициенте сопротивления при транспортировании фрезерного торфа по горизонтальным трубам // Горный журнал, 1960. № 7. С. 35–42.

77. Самсонов Л.Н., Сеницын В.Ф. Торфяные машины и комплексы: Учебник для ВУЗов. Ч. 3. Тверь: ТГТУ, 2001. 140 с.

78. Калинушкин М.П. Обеспыливающие установки. М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1957. 144 с.

79. Горцакалян Л.О. Расчет и конструирование пневматических установок для уборки и транспортировки фрезерного торфа. Калинин: КПИ, 1973. 120 с.

80. Спиваковский А.О., Мучник В.С., Юфин А.П. Гидравлический и пневматический транспорт на горных предприятиях. М.: Мосгосгортехиздат, 1962. 252 с.

81. Чернышев В.В., Горцакалян Л.О., Ворзонин В.А. Исследование механизма взвешивания торфяной фрезерной крошки с залежи во всасывающем факеле сопла с пневмоуборочной машины // Механизация добычи торфа: сб. научн. тр. М.: Недра, 1974. вып. XVII (XIII). С. 17–21.

82. Викторов М.С., Маринин О.О., Смык А.Ф. Применение эффекта Магнуса в инфраструктуре дороги // Автомобиль, дорога, инфраструктура. 2019. № 1(19). С. 23–31.

83. Керученко Л.С., Мальцева Е.И. Механизм осаждения частиц загрязнений в капиллярных каналах // Инновационные технологии в машиностроении: сб. тр. VIII Междун. научно-практ. конф. 18–20 мая 2017.

г. Юрга. Томск: ТПУ, 2017. С. 288–293. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/45708> (дата обращения 06.11.2021).

84. Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа, смазки. Красноярск: Красноярский гос. аграрный университет, 2013. 192 с.

85. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1977. 280 с.

86. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. – Москва: Недра, 1985, 211 с.

87. Амарян Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. М.: Недра, 1969. 192 с.

88. Горфин О.С., Фомин К.В. Конвейерный транспорт. Тверь: ТГТУ, 2008. 114 с.

89. URL: http://genphys.phys.msu.ru/slepkoV/glava_9-int.pdf (дата обращения 15.02.2022).

90. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975. 380 с.

91. URL: https://yandex.ru/images/search?text=коэффициент%20лобового%20сопротивления%20для%20шара&stype=image&lr=14&source=wiz&pos=5&img_url=https%3A%2F%2Fi5.rae.ru%2Fupfs%2Fi%2F2011%2F06%2Fimage18.jpg&rpt=simage (дата обращения 06.11.2021).

92. Адельсон С.В. Процессы и аппараты нефтепереработки и нефтехимии. М.: ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1963. 311 с.

93. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (дата обращения 15.02.2022).

94. Прандтль Л. Эффект Магнуса и ветряной корабль // Успехи физических наук, 1925. Т. 5. Вып. 1–2. С. 1–27.

95. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыления воздуха. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 240 с.

96. Эффект Магнуса. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Магнуса (дата обращения 06.11.2021).
97. Никитин Е.М. Теоретическая механика. М.: Наука. Главная редакция физико-математической лит-ры, 1983. 336 с.
98. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime // Indian Journal of Science and Technology, 2016. vol. 9. No. 12. p. 89525.
99. Гейлер В.Л., Дубовиков С.Л. Опыт работы ЗАО «Росторфинвест» // Торф и Бизнес, 2006. № 1(3). С. 18–21.
100. Термоанемометр Venetech GM8903. URL: https://supereyes.ru/catalog/anemometr/termoanemometr_benetech_gm8903/?r1=yandext&r2=&yclid=5743894102714669263 (дата обращения 30.09.21).
101. Yablonev A., Scherbakova D. [Evaluation of KTT-2 Pneumatic Peat Harvesting Machine's Nozzle Suction Capacity](#) // E3S Web of Conferences Vol. 174. Vth International Innovative Mining Symposium, 2020. article No. 01044.
102. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование всасывающего факела торфяной пневмоуборочной машины КТТ-2 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал), 2019. № 12 S39. С. 47–58. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-12-39-47-58](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-39-47-58)
103. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование работы всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки», 2020. № 3(7). С. 40–49. DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-40-49.
104. Singh K. Allocation and Sustainable Management of Peat Resources on Public Land // AEP Public Land Management, 2016. No. 9. pp. 1–14.
105. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование работы всасывающего сопла машины для пневматической уборки фрезерного торфа // В сб. «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». Мат-лы XVIII Междун. научно-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека», в год памяти и славы горняков, к 75-летию Победы в

Великой Отечественной войне. Под общ. ред. Ю.А. Лагуновой. Екатеринбург, 2–3 апреля 2020 г. Екатеринбург: УГГУ, 2020. С. 80–83.

106. ГОСТ Р 50902-2011 «Торф топливный для пылевидного сжигания». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200085577> (дата обращения 24.10.2020).

107. ГОСТ 13672-76 «Торф фрезерный для производства брикетов. Технические требования». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200024027> (дата обращения 24.10.2020).

108. ГОСТ Р 52067-2003 «Торф для производства питательных грунтов». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200032117> (дата обращения 24.10.2020).

109. ГОСТ 51213-98 «Торф низкой степени разложения». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200026840> (дата обращения 24.10.2020).

110. ГОСТ 11130-75 «Торф. Методы определения мелочи и засоренности». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200024151> (дата обращения 24.10.2020).

111. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование аэродинамических параметров фрезерного торфа, добываемого ООО «Пиндструп» // Труды ИнсТорфа, 2020, № 22(75). С. 32–38.

112. Пат. РФ № 2760605 МПК E21C 49/00 Пневматическая лабораторная установка для исследования скорости всасывания торфяной крошки. Заявка № 2020143755: заявл. 28.12.2020 / Яблонев А.Л., Щербакова Д.М., Гусева А.М., Купорова А.В.; заявитель ФГБОУ ВО ТвГТУ.

113. Яблонев А.Л. Торфяные машины, их эксплуатация и ремонт. Лабораторный практикум: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2019. 112 с.

114. Chertkova E., Sizova V. Production and Technological Parameters of Milled Peat Extraction Depending on Organization of Peat Machines Operations // E3S Web of Conferences: IVth International

Innovative Mining Symposium, 2019. Vol. 105. p. 01002.
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501002>

115. Прягаев Ю.В. Есть ли будущее у пневмовалкователя? // Торф и Бизнес, 2007. № 2(8). С. 23–26.

116. Yablonev A., Misnikov O., Scherbakova D., Goryachev V. [Study of the dependence of the air flow velocity on the parameters of the suction nozzle installation of the peat pneumatic harvesting machine](#) //E3S Web of Conferences Vol. 278. The Second Interregional Conference “Sustainable Development of Eurasian Mining Regions (SDEMR-2021)”, 2021. article No. 01021.
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127801021>

117. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Обоснование параметров установки сопла торфяной пневмоуборочной машины над подстилающей поверхностью залежи // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки», 2021. № 4(12). С. 38–45. DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-38-46

118. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Зависимость фактической длины оси всасывающего факела от угла установки сопла торфяной пневмоуборочной машины // Международный научно-исследовательский журнал, 2021. № 11 (113) ч. 1. С. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.113.11.015>

119. Заявка на изобретение РФ № 2021117767 Насадки для рабочего органа пневмоуборочной машины в виде сопла / А.Л. Яблонев, Д.М. Щербакова, А.М. Гусева. Заявл. 16.06.2021 г.

120. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Обоснование параметров мундштука для всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // Вестник ТвГТУ. Серия «Технические науки», 2022. № 1(13). С. 46–56.

121. Богатов Б.А., Копенкин В.Д. Математические методы в торфяном производстве. М.: Недра, 1991. 240 с.

122. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.

123. Волкус С.П., Кислов Н.В. Исследование аэродинамики пневмоуборочного сопла // Технология торфяного производства и торфяные машины. Вып. 2. Минск: Вышэйшая школа, 1973. С. 23–29.

124. Волкус С.П., Кислов Н.В. Результаты определения потерь давления в пневмоуборочном сопле при работе на чистом воздухе // Технология торфяного производства и торфяные машины. Вып. 2. Минск: Вышэйшая школа, 1973. С. 78–91.

125. Кислов Н.В., Волкус С.П. Исследование работы пневматических сопел на торфовоздушной смеси // Технология торфяного производства и торфяные машины. Вып. 2. Минск: Вышэйшая школа, 1973. С. 92–102.

126. Рогов В.А. Влияние состава и свойств древесной пыли на режим работы и параметры централизованной пылеуборочной установки. Дис. ... канд. техн. наук. по спец. 05.21.05. Красноярск: СибНИИЛП, 1983. 225 с.

127. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Определение длины оси активной зоны всасывающего факела торфяной пневмоуборочной машины // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: мат-лы XVII Междун. конф. (Тула, 1–3 ноября 2021 г.). Тула: ТулГУ, 2021. С. 67–73.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2760605

**Пневматическая лабораторная установка для
исследования скорости всасывания торфяной крошки**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Тверской государственный технический университет"
(RU)*

Авторы: *Яблонев Александр Львович (RU), Щербакова Дарья
Михайловна (RU), Гусева Анна Михайловна (RU),
Купорова Александра Владимировна (RU)*

Заявка № 2020143755
Приоритет изобретения 28 декабря 2020 г.
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 29 ноября 2021 г.
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 28 декабря 2040 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Документ подготовлен в соответствии
с требованиями Федерального закона
от 19.04.2002 № 48-ФЗ "Об интеллектуальной собственности"
и Положения о Государственном реестре изобретений
Российской Федерации от 15.05.2002 № 10/03-2002-100

Г.П. Ивлиев





Общество с ограниченной ответственностью «ПИНДСТРУП»

Псковская область, 181013, Плюсский муниципальный район, г.п. Заплюсье, тер. промзона Замошье, д. 1, к. 205
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Центральная, владение 20Б, строение 1, офис 1115
Тел +7 495 197 89 65 · +7 495 197 89 66 · pindstrup@pindstrup.ru, ИНН/КПП 601605407/601601001

Утверждаю:
Генеральный директор ООО «ПИНДСТРУП»


В.Л. Гейлер

« 8 » декабря 2021 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Щербаковой Дарьи Михайловны в производственный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Щербаковой Дарьи Михайловны на тему «Обоснование рациональных параметров всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины» в части:

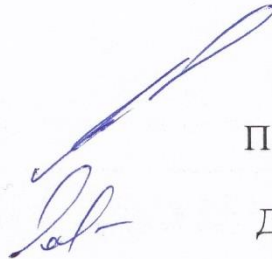
- рекомендаций по рациональным углам установки всасывающего сопла, активации и атаки расстила;
- конструкции мундштука на всасывающее сопло

внедрены и используются на предприятии ООО «ПИНДСТРУП» при доработке и эксплуатации торфяных пневмоуборочных машин КТТ-2.

Работы проводились на производственном участке по добыче торфа в сезонах 2020 и 2021 г.г.

Механик

Начальник участка



П.Д. Леонтьев

Д.А Лысак

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
**«Тверской государственный технический
университет» (ТвГТУ)**

Наб. А.Никитина, д.22, г.Тверь, 170026

Тел. (4822) 78-63-35, факс (4822) 52-62-92

E-mail: common@tstu.tver.ru

<http://www.tstu.tver.ru>

ОКПО 02068284, ОГРН 1026900533747,

ИНН/КПП 6902010135 / 695201001

№ _____
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор

по учебной работе ТвГТУ

д.филос.н. Майкова Э.Ю

«24» *августа* 2022 г


Акт

о внедрении результатов диссертационной работы
Щербаковой Дарьи Михайловны

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Щербаковой Дарьи Михайловны на тему «Обоснование рациональных параметров всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины» в части методики проведения лабораторной работы по дисциплине «Нагнетатели и тепловые двигатели» для направления подготовки бакалавриата 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» внедрены на кафедре «Гидравлика, теплотехника и гидропривод» ТвГТУ.

Заведующий кафедрой ГТиГП

Доцент кафедры ГТиГП



А.Л. Яблонев

Н.П. Курбатов