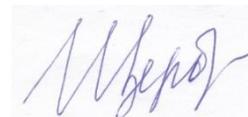


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Тверской государственный технический университет

*На правах рукописи*



**ЩЕРБАКОВА ДАРЬЯ МИХАЙЛОВНА**

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

Научная специальность – 05.05.06 «Горные машины»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ТВЕРЬ – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ) на кафедре «Технологические машины и оборудование».

Научный руководитель: **ЯБЛОНЕВ Александр Львович**,  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Гидравлика,  
теплотехника и гидропривод» ФГБОУ ВО  
«Тверской государственный технический  
университет»

Официальные оппоненты: **ПОТАПОВ Валентин Яковлевич**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Горная механика» ФГБОУ ВО  
«Уральский государственный горный  
университет»  
**ЗАДКОВ Денис Александрович**, кандидат  
технических наук, доцент, доцент кафедры  
машиностроения ФГБОУ ВО «Санкт-  
Петербургский горный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный  
технический университет имени  
Т.Ф. Горбачева»

Защита состоится «29» сентября 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.262.07 на базе ФГБОУ «Тверской государственный технический университет» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22, ауд. Ц-208.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» и на сайте ВУЗа по адресу: <http://www.tstu.tver.ru/science/dissertation/212.262.07>

Автореферат разослан «15» августа 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.262.07

**Гультияев Вадим Иванович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Отечественная продукция, изготовленная на основе фрезерного торфа, пользуется устойчивым коммерческим спросом. 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 всасывающего сопла является актуальным.

**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, В.И.

Бакшинского, В.А. Ворзоница, Л.С. Кашенко, В.Н. Серова и др. Исследования по пневматическому транспорту и аэродинамическим свойствам сыпучих сред (в т. ч. торфяных) выполнены А.О. Спиваковским, А.Б. Горенштейном, Д.Н. Жилиным, В.М. Наумовичем, Н.С. Панкратовым, М.И. Сарматовым, В.В. Шавелем, М.П. Калинушкиным, М.Ф. Бромлеем и др. Все эти исследования, так, или иначе, касались зон транспортирования и разделения торфовоздушной смеси. Крайне мало исследований, касающихся зоны всасывания. 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.

**Объект 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 математическую модель, описывающую зависимость теоретической скорости воздушного потока, необходимую для пневмоуборки от параметров торфяной частицы;

– 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 30–35°. 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 несколько отличается от справочных 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 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, формулировании основных положений и подготовке публикаций.

**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 ПМС-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, 1–4 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 и 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 13 печатных работах, включая 1 статью в изданиях, индексируемых базами Web of Science и Scopus, 4 статей 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».

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В главе 1 представлено краткое описание и особенности технологии добычи фрезерного торфа с помощью пневмоуборочных машин. Отмечено, что большинство проведенных исследований затрагивали транспортирующий участок пневмоуборочной машины, в то время, как исследований по всасывающему участку, являющемуся одним из наиболее проблемных мест, крайне мало. Рассмотрены конструкции всех известных на сегодняшний день пневмоуборочных машин, как советского, так и зарубежного производства. Описаны известные методики по оценке скорости витания торфяной крошки. Из-за важности отдельно описаны исследования по определению парусности торфяных частиц и аэродинамических характеристик сыпучих материалов при транспортировании и разделении горных пород. В этом направлении следует особо выделить работы А.И. Афанасьева, В.Я. Потапова, Я.К. Абрамова, В.М. Веселова, V. Blaess, H. Gutzeit, W. Barth и др. В заключении главы сформулированы цель работы и задачи исследования.

Глава 2 посвящена теоретическим исследованиям взаимодействия воздушного потока с частицей торфа. Отмечено, что на частицу торфа, находящуюся в зоне всасывающего факела действуют силы: тяжести  $F_T$ , адгезии  $F_{ад}$ , трения  $F_{тр}$ , сцепления  $F_{сц}$ , лобовая  $F_L$  и подъемная  $F_n$ .

При обтекании частицы торфа сверху и снизу воздушным потоком из-за трения появляется градиент скорости, порождающий крутящий момент, и неравномерное вращения частицы с циркуляцией воздуха вокруг нее. По этой причине давление под частицей возрастает, а над частицей – уменьшается, вследствие чего возникает направленная вертикально вверх сила Магнуса  $F_M$ , часто используемая в аэродинамике в качестве подъемной и определяемая по формуле Н.Е. Жуковского.

Для случая отрыва шарообразной частицы торфа от подстилающей поверхности необходимо выполнение предварительного условия  $F_M \geq F_T$ :

$$\frac{\pi}{\alpha} \rho_B r^2 v_B v_{ш} \geq \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_T g, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол направления воздушного потока, рад;  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $r$  – радиус шарообразной частицы;  $v_B$  – скорость воздушного потока м/с;  $v_{ш}$  – скорость шарообразной частицы, м/с;  $\rho_T$  – плотность торфяной частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Рассматривая (1) относительно скорости шарообразной частицы можно записать:

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

Подставляя ориентировочные данные ( $v_B \approx 10$  м/с,  $\rho_T \approx 500$  кг/м<sup>3</sup>,  $\alpha = \pi$ ,  $r \approx 0,0125$  м,  $\rho_B \approx 1,205$  кг/м<sup>3</sup>) в формулу (2) получим  $v_{ш} \geq 21,3$ , м/с, что соответствует частоте вращения частицы более 271 об/с. Вращение торфяной частицы с такой частотой невозможно, следовательно, невозможно и появление силы Магнуса.

Согласно уравнению Д. Бернулли для двух сечений (1-1 – над торфяной частицей и 2-2 – под ней) для частицы, лежащей на горизонтальной поверхности ( $z_1 \approx z_2 = 0$ ) можно записать:

$$P_1 + \frac{\rho_B v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_B v_2^2}{2}, \quad (3)$$

где  $z_1$  и  $z_2$  – координаты расположения плоскостей 1-1 и 2-2 относительно плоскости сравнения;  $P_1$  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 ней  $v_2 \approx 0$ , тогда разница давлений, составляющая:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho_B v_1^2}{2} \quad (4)$$

порождает появление подъемной силы, пропорциональной площади Миделя  $S_M$ .

$$F_{п} = S_M \Delta P = S_M \frac{\rho_B v_1^2}{2}, \quad (5)$$

Для условия отрыва частицы от поверхности расстила должно выполняться условие:

$$\frac{F_{\Pi}}{F_T} = \frac{3\rho_B v_1^2}{4r\rho_T g} \geq 1, \quad (6)$$

откуда скорость воздушного потока необходимая для подъема частицы:

$$v_{\Pi} = v_1 \geq \sqrt{\frac{4r\rho_T g}{3\rho_B}}. \quad (7)$$

Принимая значения величин, входящих в формулу (7) такими же, как и в формуле (2) получим ориентировочную скорость  $v_{\Pi} \geq 8,2$  м/с, что хорошо согласуется с результатами опытов других исследователей.

Расчетная схема взаимодействия воздушного потока с частицей представлена на рисунке 1.

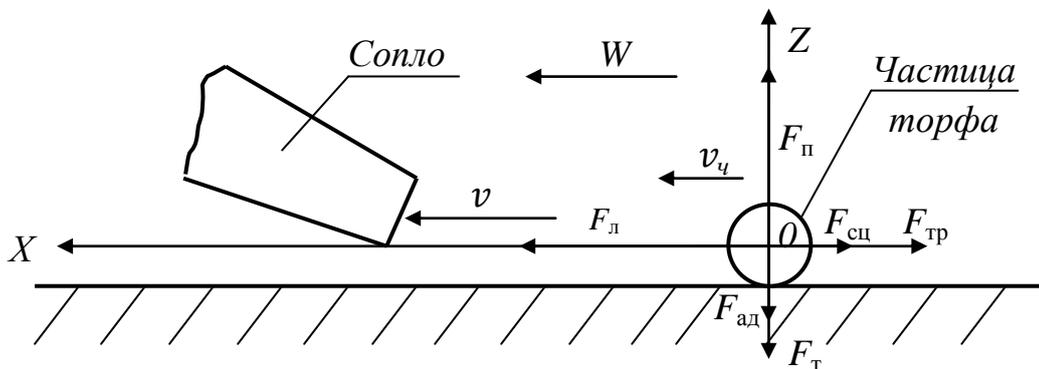


Рисунок 1 – Силы, действующие на частицу в зоне всасывающего факела

В результате рассмотрения дифференциальных уравнений движения частицы для моментов страгивания ее с места и отрыва от подстилающей поверхности, нами получены формулы, позволяющие определить необходимую теоретическую скорость турбулентного воздушного потока, с учетом всех приведенных на рисунке 1 сил, действующих на частицу:

$$v_{x_T} > \sqrt{\frac{f\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g + \pi r \sigma\right) + c S_{\text{сц}}}{c_L \frac{\rho_B}{2} S_M}} + W, \quad (8)$$

$$v_{\Pi} > \sqrt{\frac{8\pi r^3 \rho_T g}{3 S_M \rho_B}} + W, \quad (9)$$

где  $v_{x_T}$  – скорость, необходимая для страгивания частицы с места в горизонтальной плоскости, м/с;  $v_{\Pi}$  – скорость, необходимая для отрыва частицы от подстилающей поверхности, м/с;  $c$  – сцепление, Па;  $S_{\text{сц}}$  – площадь сцепления, м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $W$  – скорость поступательного движения торфяной пневмоуборочной машины, м/с;  $c_L$  – коэффициент лобового сопротивления частицы.

Глава 3 посвящена исследованию по измерению скорости воздушного потока в зависимости от расстояния удаления от всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины КТТ-2, проведенному в полевых условиях предприятия ООО «Пиндstrup».

Для исследования применялся термоанемометр GM8903 с функцией измерения температуры воздуха, имеющий возможность совмещения с ПК и диапазон измеряемой скорости от 0,3 до 30 м/с при точности измерения  $\pm 3\%$ . Перед всасывающим соплом укладывалась металлическая координатная сетка с шагом ячейки 100 мм, в узлах которой устанавливался выносной щуп термоанемометра (рисунок 2). Все показания снимались с 5-ти кратной повторяемостью.



Рисунок 2 – Измерение скорости воздушного потока перед соплом

Результаты исследования представлены в виде графика зависимости скорости воздушного потока от координаты расположения точки замера по длине сопла и по удалению от него по оси факела (рисунок 3).

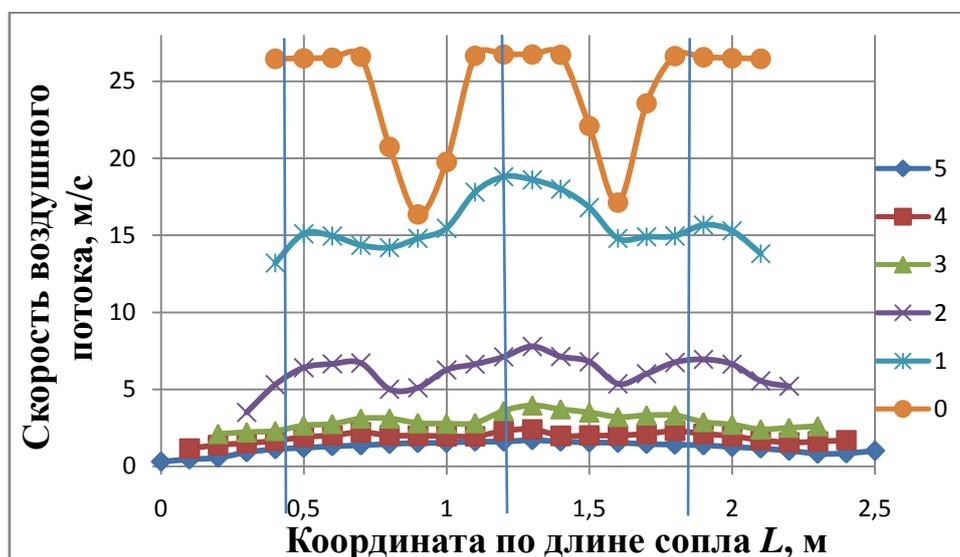


Рисунок 3 – Зависимость скорости воздушного потока при всасывании соплом машины КТТ-2 от координаты по длине сопла и расстояния удаления точки замера от сопла по линии оси факела: 0 – удаление равно 0 (скорость измерена на входе в сопло); 1 – удаление от сопла – 0,1 м; 2 – удаление от сопла – 0,2 м; 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, показал, что во всех кривых присутствуют две зоны «провала» скорости потока, объясняемые наличием воздухонепроницаемых усилительных ребер, связывающих нижнюю и верхнюю кромки стеклопластикового сопла. Максимальная скорость воздушного потока по осевой линии на входе в сопло составила  $26,7 \pm 0,8$  м/с. Для трех осей всасывающего факела ( $L = 0,6; 1,3; 1,9$  м) построены зависимости скорости воздушного потока от расстояния удаления от всасывающего сопла (рисунок 4).

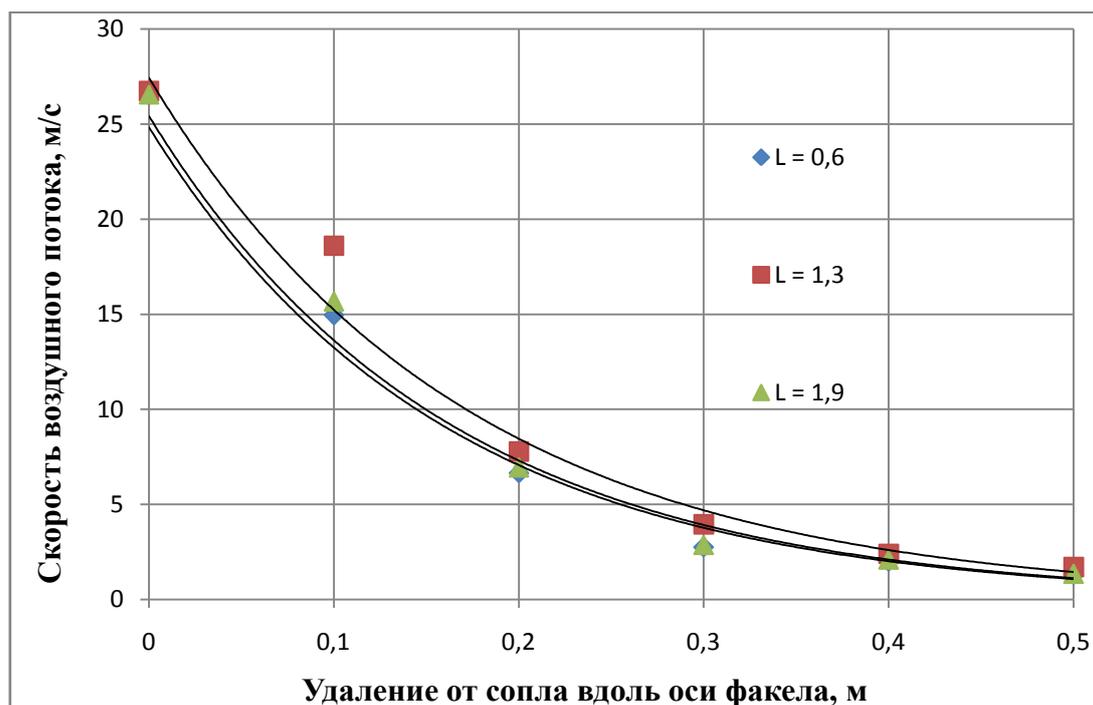


Рисунок 4 – Зависимость скорости воздушного потока от расстояния до сопла

Для лежащих в центральной части сопла осей всасывающего факела можно рекомендовать формулу, полученную нами в результате аппроксимации опытных данных (рисунок 4):

$$v = 27,4e^{-5,9x} . \quad (10)$$

Ввиду невысокого максимального значения скорости всасывания, предприятию можно рекомендовать повысить ее путем уменьшения высоты входной щели сопла со 100 до 80 мм. Поскольку воздухонепроницаемые усилительные ребра сопел значительно ослабляют всасывающий факел, следует рассмотреть вопрос об изготовлении их с ориентацией длинной стороны вдоль линий тока.

Глава 4 посвящена экспериментальному обоснованию параметров установки всасывающего сопла, проведенному в лабораторных условиях на специально разработанной и созданной установке (рисунок 5).



Рисунок 5 – Пневматическая лабораторная установка

Объектами исследования стали модель всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины КТТ-2 и сырье – торф с месторождения «Заплюские Мхи» (ООО «Пиндструп»). Поскольку месторождение сложено в основном верховым и переходным торфом, то образцы такого торфа 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 –  $R = 35\text{--}40\%$ . Из имеющегося сырья в лаборатории методом калибровки при пропускании через сито была искусственно приготовлена фрезерная крошка максимальной кондиционной фракции – 25 мм. После сушки в мягком теневом режиме крошка имела следующую характеристику (для верхового и переходного торфа, соответственно): влагу – 44 % и 48,45 %; плотность –  $355\text{ кг/м}^3$  и  $518\text{ кг/м}^3$ ; скорость витания (определенную по стандартной методике в аэродинамической витательной трубе кафедры «Технологические машины и оборудование») – 10,8 и 14,4 м/с. При этом экспериментально определенная скорость витания торфяных частиц оказалась несколько меньше теоретической (13,3 и 15,6 м/с для верхового и переходного торфа), что можно объяснить отсутствием учета влажности и отклонения от формы шара в теоретическом методе определения.

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 (технологический критерий). 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 (технический критерий). 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 трения добываемой породы, поскольку попавший в сопло под действием струи воздуха фрезерный торф не должен самопроизвольно скатываться вниз. Поэтому было принято решение о проведении серии лабораторных экспериментальных работ, по замеру скоростей воздушного потока на различных расстояниях от сопла и непосредственному всасыванию торфяной фрезерной крошки, целью которых являлось определение рациональных параметров установки и работы физической модели всасывающего сопла. Скорость воздушного потока на входе в сопло поддерживалась постоянной –  $26,7 \pm 0,8$  м/с, высота расположения сопла над подстилающей поверхностью изменялась от 0 до 25 мм, угол установки сопла  $\alpha$  – от  $10^\circ$  до  $45^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . Скорость воздушного потока в точках замера фиксировалась термоанемометром GM8903. Все опыты проводились с 5-ти кратной повторяемостью. Результаты замеров для случая высоты расположения сопла  $h = 25$  мм представлены на рисунке 6.

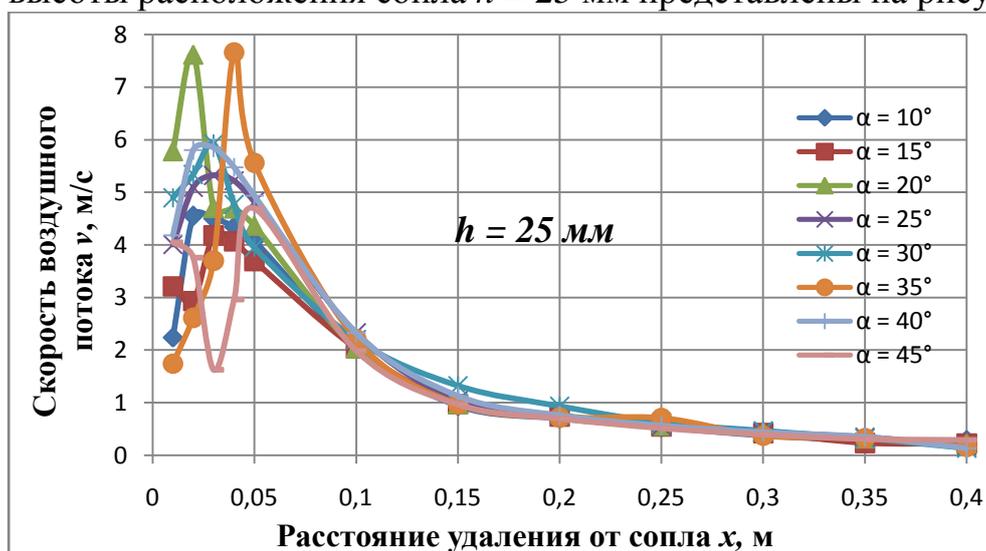


Рисунок 6 – Зависимость скорости воздушного потока  $v$  от расстояния удаления от сопла  $x$  при различных углах установки сопла  $\alpha$  и высоты сопла над подстилающей поверхностью  $h = 25$  мм

Анализ полученных данных показал, что наибольшие колебания амплитуд воздушного потока, необходимые для создания подъемной силы, и свидетельствующие о турбулентности, присутствуют при высоте расположения сопла  $h = 25$  мм. 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 10–45°. Вероятность всасывания частицы тем выше, чем больше длина оси активной зоны всасывающего факела. Поэтому последняя и была принята в качестве критерия эффективности всасывания.

Такое исследование было проведено. В ходе него опытные образцы фрезерной крошки помещались на ленту конвейера лабораторной установки, с помощью реостата устанавливалась скорость всасывания, близкая к реальной для машины КТГ-2 ( $26,7 \pm 0,8$  м/с), и лента приводилась в движение. При приближении образца фрезерной крошки к всасывающему соплу наступал момент страгивания крошки с места и всасывание. Расстояние от сопла до точки, в которой начинался «разгон» крошки под воздействием воздушной струи измерялось линейкой с точностью до 1 мм, эксперимент повторялся не менее 6 раз, после чего определялось среднее значение расстояния, представляющее собой длину оси активной зоны всасывающего факела (рисунок 7).

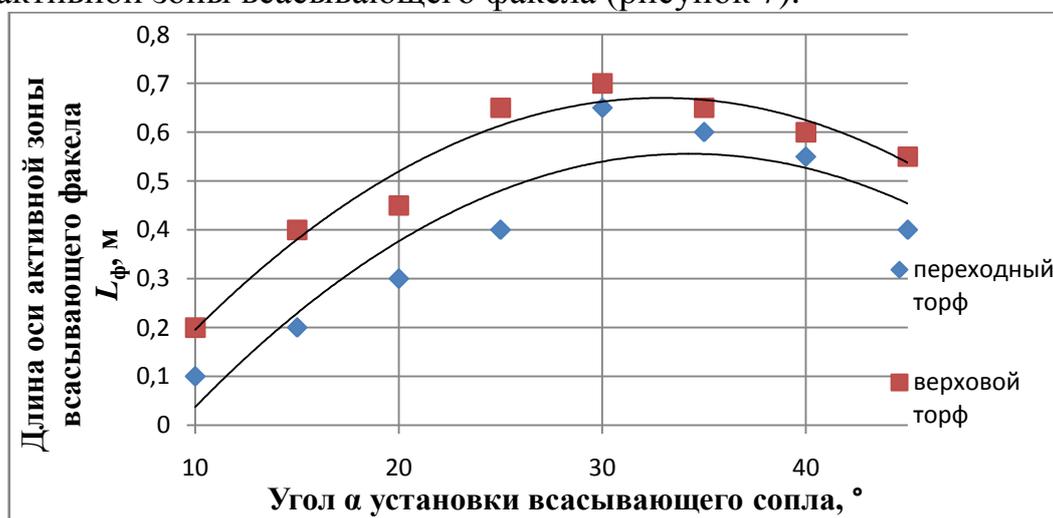


Рисунок 7 – Зависимость длины оси активной зоны всасывающего факела от угла установки сопла

В результате получены две зависимости:

– для исследованного верхового торфа:

$$L_{фв} = -0,09\alpha^2 + 5,95\alpha - 30,9, R^2 = 0,95, \quad (11)$$

– для исследованного переходного торфа:

$$L_{фп} = -0,09\alpha^2 + 6,04\alpha - 47,8, R^2 = 0,87. \quad (12)$$

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  $\alpha \rightarrow 35^\circ$ .

Для оценки сходства или различия статистических показателей зависимостей, представленных на рисунке 7 и подверженных влиянию

случайных факторов, применялся метод проверки статистических гипотез, который показал, что на длину оси активной зоны всасывающего факела влияют одни и те же факторы, а сравниваемые средние являются выборками одной и той же генеральной совокупности.

Установлено, что силы сцепления и адгезии частиц торфа на порядок меньше лобовой силы и силы тяжести, поэтому могут не учитываться при определении скорости воздушного потока, необходимой для страгивания частицы с места. Уточненное выражение (8) для исследованных условий:

$$v_{x_T} > K \sqrt{\frac{\frac{4}{3}f\pi r^3 \rho_T g}{c_l \frac{\rho_B S_M}{2}}} + W \quad (13)$$

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 –  $K = 0,42$ .

Глава 5 посвящена обоснованию рациональной конструкции насадка на сопло, способного повысить эффективность всасывания. Данная задача ставилась и ранее рядом исследователей, однако, ограничение зоны всасывания одним лишь козырьком сверху и отсутствие критерия оценки эффективности всасывания не позволяли достичь желаемого результата. Для решения такой задачи были разработаны и изготовлены мундштуки, ограничивающие зону всасывания сверху и с боков (рисунок 8).

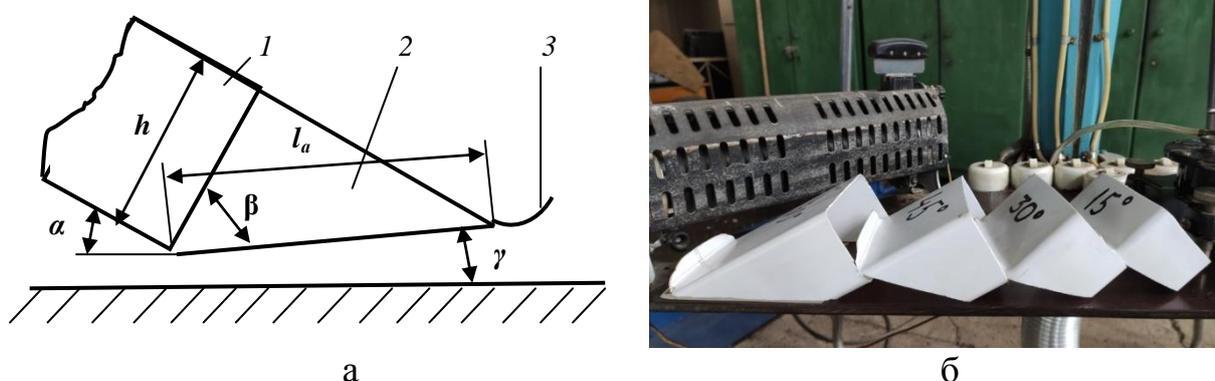


Рисунок 8 – Углы установки сопла и мундштука (а) и изготовленные модели мундштуков (б): 1 – всасывающее сопло; 2 – мундштук; 3 – козырек перед входом в мундштук;  $\alpha$  – угол установки всасывающего сопла;  $\beta$  – угол активации расстила;  $\gamma$  – задний угол мундштука;  $l_a$  – активная длина мундштука;  $h$  – высота входной щели сопла

Угол  $\beta$ , 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  $\theta$ , представляющий собой сумму углов установки сопла  $\alpha$  и активации расстила ( $\theta = \alpha + \beta$ ) назван нами «углом атаки расстила» (рисунок 8 а).

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  $60^\circ$  (рисунок 8 б).

Для оценки эффективности всасывания была исследована скорость воздушного потока на расстоянии удаления от сопла и определена длина оси активной зоны всасывающего факела (по методике, представленной в главе 4) сопла с установленными мундштуками (рисунок 9).

Наиболее рациональными параметрами установки сопла и активации расстила можно считать, обеспечивающие 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  $\beta \rightarrow 60^\circ$  (рисунок 10).



Рисунок 9 – Всасывающее сопло с установленными мундштуками

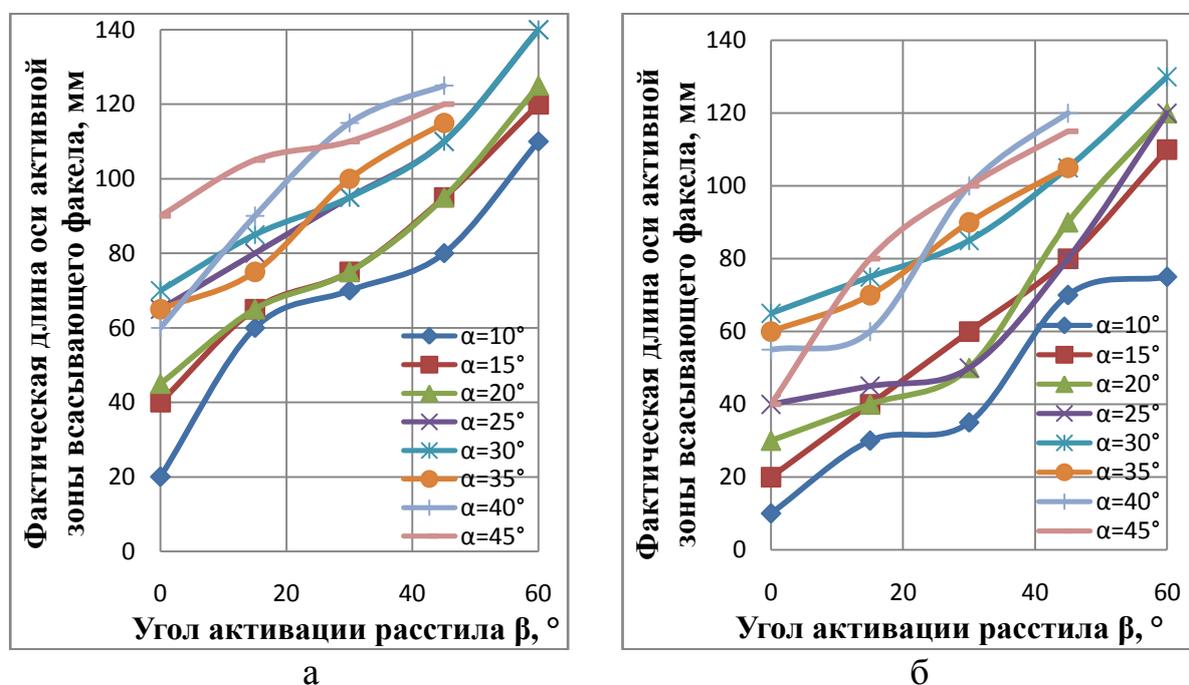


Рисунок 10 – Зависимость длины оси активной зоны всасывающего факела от угла установки сопла  $\alpha$  и переднего угла мундштука (угла активации расстила)  $\beta$  для верхового (а) и переходного (б) торфа

Следовательно, угол атаки расстила  $\theta = \alpha + \beta \rightarrow 90^\circ$ . Однако, тогда задний угол (рисунок 8 а)  $\gamma \rightarrow 0^\circ$ . 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. В качестве сравнения эффективности всасывания соплом с рациональным углом установки  $\alpha = 30^\circ$  фрезерной крошки из верхового и переходного торфа по материалам рисунка 10 построены графики, позволившие получить уравнения зависимости длины оси активной зоны всасывающего факела  $L_{\text{фм}}$  (мм) от угла активации расстила  $\beta$  (рисунок 11). Уравнения имеют следующий вид:

– для верхового торфа

$$L_{\text{фмв}} = 0,004\beta^2 + 0,814\beta + 71,14, \quad R^2 = 0,96. \quad (15)$$

– для переходного торфа:

$$L_{\text{фмп}} = 0,012\beta^2 + 0,304\beta + 65,71, \quad R^2 = 0,99, \quad (16)$$

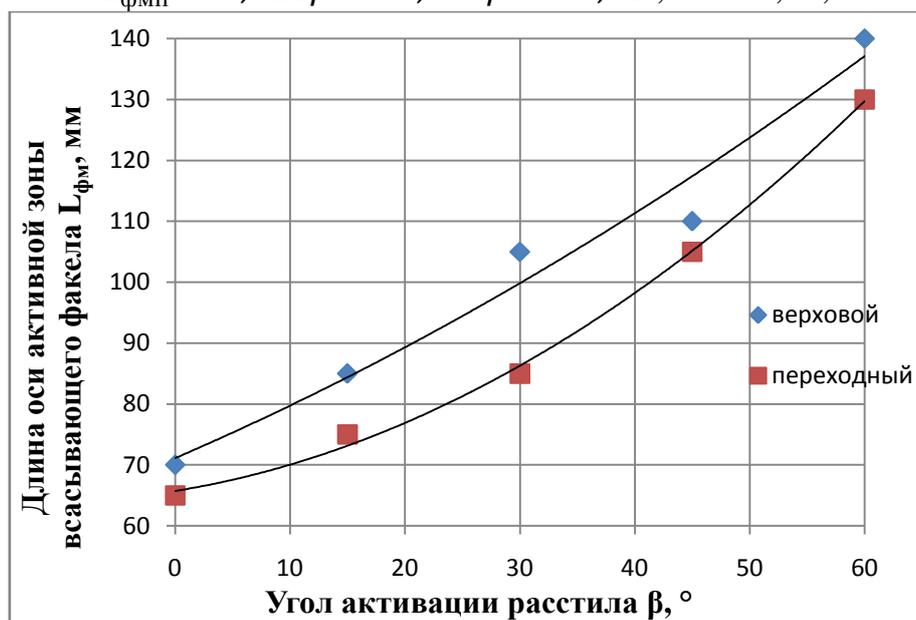


Рисунок 11 – Сравнение эффективности работы сопла, установленного под углом  $\alpha = 30^\circ$  при всасывании верхового и переходного торфа и высоте расположения сопла от подстилающей поверхности  $h = 25$  мм

Рассчитанные коэффициенты корреляции для верхового ( $r_{\text{в}} = 0,981$ ) и переходного ( $r_{\text{п}} = 0,945$ ) торфа показали практическую функциональную связь (сходимость) длины оси активной зоны всасывающего факела с углом активации расстила.

Сравнение данных, приведенных на рисунках 7 и 11, дает возможность утверждать, что использование предложенной конструкции активизирующего мундштука более чем в два раза увеличивает длину оси активной зоны всасывающего факела, в результате чего возрастает время воздействия воздушного потока на торфяную частицу, а, следовательно – увеличивается производительность торфяных пневмоуборочных машин.

### **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. Разработаны математические модели, позволяющие определять скорости воздушного потока, необходимые для страгивания торфяной частицы с места и отрыва ее от подстилающей поверхности.

3. Получен патент на изобретение лабораторной установки для исследования работы всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины, позволяющая испытывать модели сопел с углами установки 0–90° к поверхности расстила, обеспечивая высоту сопла 0–200 мм.

4. 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°, и высота расположения сопла над подстилающей поверхностью – 25 мм. Получены математические модели, описывающие зависимость фактической длины оси активной зоны всасывающего факела от угла установки.

5. 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».

6. Обоснованы рациональные параметры мундштука на сопло по критерию максимальной длины оси активной зоны всасывающего факела. С учетом необходимого заднего угла  $5^\circ$ , угол атаки расстила должен составлять  $85^\circ$ . 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.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus

1. Yablonev A., **Scherbakova D.** Evaluation of KTT-2 Pneumatic Peat Harvesting Machine's Nozzle Suction Capacity // E3S Web of Conferences Vol. 174. V<sup>th</sup> International Innovative Mining Symposium, 2020. No. 01044. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401044>

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК России

2. 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)

3. 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>

4. 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](https://doi.org/10.46573/2658-5030-2021-4-38-46)

5. 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.

### Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ

6. 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 XIV Междун. конф. (Тула, 30–31 октября 2018 г.). Тула: ТулГУ, 2018. С. 117–124.

7. 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.
8. 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.
9. Яблонев А.Л., **Щербакова Д.М.** Исследование работы всасывающего сопла машины для пневматической уборки фрезерного торфа // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Мат-лы XVIII Междун. научно-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека». (Екатеринбург, 2–3 апреля 2020 г.). Екатеринбург: УГГУ, 2020. С. 80–83.
10. Яблонев А.Л., **Щербакова Д.М.** Исследование аэродинамических параметров фрезерного торфа, добываемого ООО «Пиндструп» // Труды ИнсТорфа, 2020, № 22(75). С. 32–38.
11. 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.
12. 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. No. 01021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127801021>

#### **Патент РФ на изобретение**

13. 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.