

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Инж. С. П. Волкус

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СОПЕЛ ПНЕВМОУБОРОЧНЫХ
ТОРФЯНЫХ МАШИН

(05.179. Машины для добычи и транспортирования
торфа)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск - 1971

Работа выполнена на кафедре "Торфяные машины" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Научный руководитель -
член-корреспондент АН БССР, доктор
технических наук, профессор

Ф.А. ОПЕЙКО

Научный консультант -
кандидат технических наук, доцент
Н.В. КИСЛОВ

Официальные оппоненты:
доктор технических наук Н.С. ПАНКРАТОВ
кандидат технических наук,
доцент М.И. КУРПАН

Ведущее предприятие - проектный институт "Белгипроторф".

Автореферат разослан "10" мая 1971 г.

Защита диссертации состоится 11 июня 1971 г. на заседании Объединенного Совета по присуждению ученых степеней по механико-технологическим, машиностроительным, автотракторным и торфяным специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Отзывы просим направлять по адресу: г. Минск, 27, Ленинский проспект 65, Белорусский политехнический институт, ученому секретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук,
доцент

Н.В. Кислов

Директивами XXIV съезда КПСС предусмотрено увеличение добычи торфа в СССР на 35–38%. Выполнение этой задачи потребует дальнейшего развития научных исследований в области механизации, автоматизации и усовершенствования технологических процессов торфодобычания.

В настоящее время широкое распространение получил пневматический способ добычи фрезерного торфа с применением пневмоуборочных и пневмовалкующих машин. Пневматический способ уборки фрезерного торфа основан на использовании воздушной струи для подбора фрезерной крошки из растила. При этом исключается механическое воздействие рабочих органов на подстилающую поверхность торфяной залежи. Эта особенность позволяет использовать пневматические машины для уборки фрезерного торфа пониженной влажности.

Первые попытки применения пневматической уборки фрезерного торфа относятся к 1928–1929 годам, когда инженеры М.И.Сарматов, С.Г.Солопов и Е.В.Чарико предложили два варианта механизации технологических операций, из которых один предусматривал применение пневматических комбайнов для уборки фрезерного торфа и одновременного фрезерования торфяной залежи на убираемой полосе.

Дальнейшему изучению процесса пневматической уборки измельченного торфа, совершенствованию пневматических торфяных машин и их внедрению в торфяную промышленность посвящены работы С.Г.Солопова, М.И.Сарматова, Б.Ф.Фадеева, А.Б.Горенштейна, А.Г.Бычкова, В.И.Хонжонкова, А.К.Халуги, Р.Я.Вебера, К.М.Волкова, Л.О.Горцакаляна, Ю.А.Познякова, С.М.Судьина, Ф.А.Опейко, К.Ф.Терпиловского.

Опыт эксплуатации различных пневмоуборочных и пневмовалкующих машин, а также результаты их испытаний, свидетельствуют о том, что наиболее ответственным узлом, от которого зависит работоспособность пневмоуборочной машины, является сопло.

Реферлируемая работа посвящена разработке рациональной методики определения аэродинамических характеристик сопел для пневматической уборки торфа, использованию этой методики для получения линий равных скоростей над поверхностью растила перед входом в сопла различных модификаций, получению обобщенных зависимостей для определения скорости горизонтального потока воздуха перед входом в сопло и поступательной скорости пневмоуборочной машины, обоснованию оптимальных геометрических параметров вход-

ной части сопла и разработке конструкции сопла с организованным входом потока.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и перечня использованной литературы.

В первой главе приведен анализ теоретических и экспериментальных работ по пневматическому транспорту различных сыпучих материалов, дан обзор конструкций пневматических сопел для уборки фрезерной крошки из расстила и на этой основе определены задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию экспериментального оборудования и разработке методики проведения опытов в лабораторных и полевых условиях.

В третьей главе изложены результаты экспериментального исследования спектров всасывания сопел для пневматической уборки торфа, приведен теоретический анализ взаимодействия воздушного потока перед входной частью сопла с торфяными частицами в расстиле, дана оценка энергетических затрат на транспортирование воздуха и торфовоздушной смеси различными соплами, предлагается ряд аналитических зависимостей для определения аэродинамических характеристик сопел и разработана конструкция входной части сопла с организованным входом потока.

Четвертая глава посвящена анализу результатов сравнительных испытаний в полевых условиях пневмоуборочных сопел серийных машин и сопел с организованным входом потока, а также разработке рекомендаций по конструкции входной части сопла с организованным входом потока для комбайна БПФ.

I

Необходимым этапом при решении задачи оптимизации процесса пневматической уборки фрезерного торфа является изучение характера изменения скорости воздушного потока в зоне перед всасывающим отверстием сопла.

Этот вопрос нашел некоторое отражение в работах К.Ф.Терпиловского, А.Б.Горенштейна, М.П.Аржавского и А.С.Никифорова, которые при измерении скоростей воздуха перед входом в сопло применяли пневмометрическую трубку ЦАГИ и шаровой зонд. Пневмометрическая трубка ЦАГИ не обеспечивает правильного определения

динамического давления в зоне действия всасывающего факела из-за того, что приемник полного и статического давления расположены в разных сечениях и при повороте трубки приемник полного давления превращается в приемник статического давления. Работа с шаровым зондом трудоемка, а сам зонд обладает недостатками трубки ЦАГИ и практически не применим для работы в полевых условиях.

На участке перед входом потока в сопло потери давления незначительны и величина статического давления по модулю равна динамическому, если отсчет ведется от условного нуля (атмосферное давление). Это соотношение было положено в основу метода измерения скоростей потока перед входом в сопло с помощью специальной пневмометрической трубки, имеющей только приемник статического давления. Равенство модулей статического и динамического давлений перед входом в сопло нарушается на некотором расстоянии X от его нижней кромки, определяемом длиной козырька L (при этом $X < L$). Поэтому указанный метод позволяет определять скорость потока в любой точке всасывающего факела, за исключением зоны, непосредственно примыкающей к входному отверстию.

Влияние конструктивных особенностей всасывающей части сопла на форму спектров всасывания и характер кривых затухания скорости воздуха в плоскости, проходящей через аэродинамическую ось сопла, было исследовано на лабораторной установке, которая состояла из сопла, циклона, бункера и воздухоудовки, соединенных между собой трубопроводами по всасывающей схеме. Сопло имело входное отверстие $A \times B = 400 \times 40 \text{ мм}^2$. Длина L козырька и угол β наклона аэродинамической оси сопла изменялись в опытах соответственно от 0 до 175 мм и от 0 до 35°. Средняя скорость воздуха U_c во входном отверстии сопла изменялась в пределах 22 - 39 м/сек.

При проведении опытов исследуемое сопло устанавливалось на планшет с координатной сеткой. Нижняя кромка входного отверстия сопла плотно прилегала к поверхности планшета. Приемное отверстие пневмометрической трубки помещалось в узловых точках планшета. Опыты проводились при работе пневматической системы на чистом воздухе. Величина динамического давления в узловых точках определялась по показаниям микроманометра. Обработка опытных данных сводилась к определению скоростей воздуха в узловых точках и линий равных скоростей (изотах) перед входом в сопла различных модификаций. По аналогичной методике были проведены также опыты с

соплами пневмовалкователя ПВПГ и пневмокомбайна БПФ.

Параллельно со снятием спектров всасывания определялись динамические и статические давления за фланцем крепления испытуемых сопел и статические давления на расстоянии $4D_r$ от входа, где D_r - гидравлический диаметр входного отверстия. Эти же показания снимались и при работе сопел на торфовоздушной смеси.

Окончательная оценка работоспособности различных модификаций пневмоуборочных сопел проводилась по величине гидравлического сопротивления сопла и его входной части, а также по характеру распределения скоростей воздуха перед входом в сопло.

Для изучения процесса пневматического подбора частиц правильной формы (шарообразных торфяных частиц диаметром 5-30 мм и объемным весом от 0,1 до 0,8 т/м³) была применена скоростная киносъемка, которая позволила определить траектории частиц перед входом в сопло и скорости движения этих частиц в зависимости от их размеров и плотности, а также от соотношения между поступательной скоростью сопла и скоростью всасывания.

Результаты экспериментальных исследований приводились к нормальным атмосферным условиям.

II

На основе опытных данных были построены спектры всасывания различных по конструкции всасывающей части сопел. При этом учитывалось, что спектры всасывания для геометрически подобных отверстий имеют одинаковый вид, если они построены в безразмерных координатах x/v и y/v , где x и y - линейные координаты точек плоскости перед входом в отверстие; b - размер меньшей стороны входного отверстия.

Сравнение спектров всасывания сопел с различной длиной козырька показало, что большинство кривых равных скоростей имеют эллиптический вид. По мере увеличения длины козырька эти кривые изменяются от явно выраженного эллипса при $L = 0$ до овала, близкого к окружности при $L = 175$ мм. При отсутствии козырька, а также при небольшой его длине, линии равных скоростей на удалении от входного отверстия $x/b \leq 2 + 3$ близки к прямым, которые расположены под некоторым углом к нижней кромке входного

сечения. При сравнительно большом увеличении длины козырька происходит некоторое увеличение зоны действия всасывающего факела. Начиная с козырька длиной 150 мм дальнейшее увеличение его дает меньший относительный эффект. Приращение ширины зоны действия всасывающего факела при увеличении L от 0 до 175 мм не превышает высоты входного отверстия.

Степень затухания скоростей воздуха у всасывающих отверстий оценивалась с помощью графиков зависимости безразмерных осевых скоростей потока от относительного расстояния. За безразмерную скорость было принято отношение осевой скорости U_x потока на некотором расстоянии X от входного отверстия к средней скорости U_c в самом отверстии. Безразмерное расстояние получено посредством отнесения значений X к гидравлическому радиусу R_r входного отверстия.

Опыты показали, что высота h расположения плоскости спектра всасывания (при $h = 2 + 25$ мм) и расход воздуха (при $U_c = 22 + 39$ м/сек) не оказывают влияния на изменение безразмерной осевой скорости потока над поверхностью расстила. Отсутствие зависимости U_x от h объясняется тем, что плоско-параллельный поток в зоне перед всасывающим отверстием сопла движется в канале, длина которого значительно меньше начального участка, где по данным Идельчика И.Е. поток обладает одинаковой по всему сечению скоростью и только в непосредственной близости от стенок, где образуется тонкий пограничный слой, скорость почти внезапно падает до нуля.

Интенсивность затухания безразмерных осевых скоростей горизонтального потока перед входом в сопло определяется при прочих равных условиях длиной L козырька и углом β наклона аэродинамической оси всасывающей части сопла к поверхности расстила. Эта зависимость имеет вид

$$\frac{U_x}{U_c - U_x} = a \left(\frac{X}{R_r} \right)^n \cdot e^m, \quad (1)$$

где a , n и m - параметры формулы, величина которых зависит от длины козырька и угла наклона оси входной части сопла в определенном интервале их изменения; e - основание натуральных логарифмов.

Анализ кривых затухания осевых скоростей потока перед входом в сопла с козырьками различной длины показывает, что увеличение L уменьшает интенсивность убывания U_x . Так, например, на расстоянии 10-ти гидравлических радиусов от нижней кромки входного отверстия сопла при $U_c = const$ осевая скорость U_x при $L = 175$ мм примерно в 2,5 раза больше скорости перед соплом без козырька. При дальнейшем увеличении расстояния x/R_r кривые затухания постепенно сходятся и относительный эффект от установки козырьков уменьшается. Уже при $x/R_r \approx 15-20$ длина козырька практически не влияет на величину U_x . Наибольший эффект от увеличения угла β наклона оси входной части сопла получается в зоне $x/R_r = 4 + 8$. Однако интенсивность затухания осевых скоростей потока с увеличением угла β все время возрастает и при $x/R_r \approx 15$ скорость U_x уже не зависит от β .

Затухание скоростей у входного отверстия сопла без козырька, а также при наличии зазора между нижней кромкой входного отверстия и поверхностью расстила, происходит более интенсивно. Изложенное позволяет сделать вывод, что над входным отверстием сопла можно выполнить такой козырек, при котором всасывание торфа из расстила будет наиболее эффективным с точки зрения полноты подбора.

Математическая обработка результатов опытов, определение расчетных осевых скоростей U_{xp} воздуха перед входным отверстием сопла и оценка сходимости опытных и расчетных данных были выполнены на ЦВМ "ПромИнв".

Расчетные формулы для определения скорости U_x имеют вид:

$$\frac{U_x}{U_c - U_x} = 2,15 \left(\frac{x}{R_r} \right)^{-(1,4 + \beta_p)} \cdot e^{2,8\beta_p} \quad (2)$$

при $L = 0$ и изменении угла наклона аэродинамической оси всасывающей части сопла в пределах $\beta = 0 + 35^\circ$ (здесь и далее β_p - угол наклона в радианах),

$$\frac{U_x}{U_c - U_x} = \frac{\left[112,3 - 23,2 \frac{L}{R_r} + 1,8 \left(\frac{L}{R_r} \right)^2 \right]^{0,5}}{\left(\frac{x}{R_r} \right)^{1,75 + \beta_p}} \cdot e^{3,5\beta_p} \quad (3)$$

при $L = 85 + 175$ мм, $\beta = 0 + 20^\circ$ и

$$\frac{v_x}{v_c - v_x} = \frac{0,9 - 5,8 \cdot 10^{-5} \left(\frac{L}{R_c}\right)^{3,8}}{\left(\frac{x}{R_r}\right)^{0,92 + 3,4\beta_p}} \exp \left\{ \left[8,9 + 2,7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{L}{R_r}\right)^5 \right] \beta_p \right\} \quad (4)$$

при $L = 85 + 175$ мм, $\beta = 20 + 35^\circ$.

Среднеквадратические отклонения на единицу веса для формул (2), (3) и (4) равны соответственно $\pm 0,32$ м/сек, $\pm 0,51$ и $\pm 0,81$ м/сек. Среднее из абсолютных значений относительных отклонений δ расчетных скоростей потока перед входом в сопло от опытных составило 6,2%.

Применимость полученных формул ограничена некоторым минимальным значением отношения x/R_r , величина которого определяется длиной козырька (табл. I).

Таблица I

L, мм	0	85	125	150	175
$(x/R_r)_{min}$	2-3	5-6	5-6	5-6	5-7

При $x/R_r = 2 + 7$ и $L = 125 + 175$ мм скорость v_x линейно связана с отношением x/R_r

$$v_x = v_c \left(0,86 - 0,06 \frac{x}{R_r} \right) \quad (5)$$

Полученные зависимости могут быть использованы также для определения оптимальных длины козырька и угла наклона оси всасывающей части сопла пневмоуборочной машины.

III

При пневматической уборке торфа воздух поступает в несколько сопел, всасывающие факелы которых взаимодействуют между собой, в результате чего скоростное поле воздушного потока оказывается не таким, как у одиночного сопла, а в промежутках между соплами наблюдается неполный подбор фрезерной крошки.

Взаимодействие всасывающих факелов было изучено в полевых условиях на смежных соплах комбайна БПФ. Средняя скорость воздуха на входе в смежные сопла изменялась в пределах 35 + 41 м/сек.

Во время опытов сопла соприкасались с поверхностью специально оборудованной площадки. Скорости воздуха определялись на высоте 2 мм от ее поверхности. В результате этих опытов были получены спектры всасывания перед входом в крайние сопла комбайна и в зоне между соседними соплами. Сопоставление спектров всасывания двух соседних сопел и одиночного сопла показывает, что в результате взаимодействия всасывающих факелов линии равных скоростей выравниваются, смещаются ближе к всасывающему отверстию и смыкаются в зоне между соплами, уменьшая длину всасывающего факела по всей его ширине примерно в 1,5 раза по сравнению с длиной рабочей зоны одиночного сопла. Для того, чтобы исключить взаимное влияние всасывающих факелов друг на друга и улучшить аэродинамическую характеристику всасывающей части сопел необходимо создать особые условия для воздушной струи, входящей в отверстие, например установкой спрямляющих решеток. В работе исследовано влияние спрямляющих решеток на форму всасывающего факела. Решетки из параллельных пластин длиной 102 мм и шириной, равной высоте входного отверстия сопла, устанавливались за плоскостью входа. Расстояние между пластинами отдельных решеток изменялось от 56 до 100 мм. Сопло имело входное отверстие 400 x 40 мм², длину козырька 85 мм и угол наклона оси входной части к горизонту 30°. Опыты показали, что форма спектров всасывания сопел со спрямляющими решетками остается такой же, как у обычного сопла, но скорость потока по ширине сопла заметно выравнивается, особенно вблизи входного отверстия. Это объясняется разделением потока пластинами решетки на ряд самостоятельных потоков в месте внезапного сужения его во входной части сопла. При этом отдельные потоки, обладающие большей скоростью, воздействуют на потоки с меньшей скоростью. В результате появляется поперечный градиент давления, под действием которого скорость потока выравнивается по ширине сопла.

Положительный эффект, который дает установка спрямляющих решеток, побудил продолжить опыты по выравниванию потока по ширине сопла путем выноса направляющих пластин под козырек входной части сопла. Такое сопло было названо соплом с организованным входом потока. Основное отличие этого сопла от применяемых на

комбайнах БПФ заключается в том, что под его козырьком непосредственно перед входным отверстием прикреплены пластины из листовой стали.

В исследованной модели сопла с козырьком 125 мм расстояние между пластинами 56 мм было установлено исходя из оптимальных размеров и формы всасывающего факела, а также наименьших потерь давления. Направляющая решетка в этом случае образована как пластинами под козырьком, так и продолжением обих боковых стенок сопла (вариант I). Средняя скорость воздуха во входных отверстиях сравниваемых сопел (с организованным входом и обычно) составила 37,8 и 36,7 м/сек. Потеря давления на вход и коэффициент гидравлического сопротивления для сопла с организованным входом потока оказались соответственно 28,2 кг/м² и 0,33, а для обычного сопла 103 кг/м² и 1,29. Таким образом, у сопла с организованным входом потока примерно при той же скорости воздуха коэффициент гидравлического сопротивления приблизительно в четыре раза меньше, чем у обычного.

Анализ спектров всасывания сравниваемых сопел (рис. I) показал, что установка направляющих пластин под козырьком сопла приводит к удлинению факела всасывания. Воздушный факел сопла с организованным входом потока более равномерен по ширине.

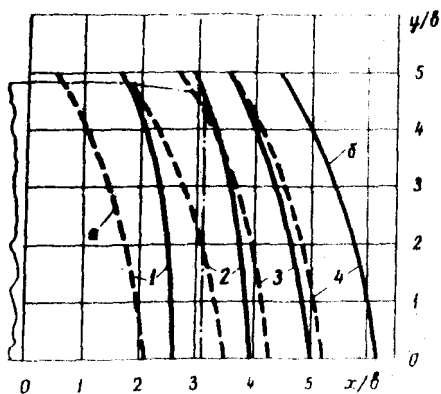


Рис. I. Спектры всасывания обычного сопла (а) и сопла с организованным входом потока (б): 1 - $U = 20$ м/сек, 2 - $U = 12$, 3 - $U = 8$, 4 - $U = 5$ и 5 - $U = 3,5$ м/сек.

В рассматриваемом случае зависимость осевой скорости U_x потока перед входом в сопло от осевого расстояния при $x/R_c \geq 5$ выражается формулой

$$U_x = U_c \frac{a_1}{a_1 + \left(\frac{x}{R_c}\right)^n}, \quad (6)$$

где a_1 - коэффициент, который зависит от наличия направляющих пластин под козырьком сопла; n - показатель степени, зависящий от угла наклона входной части сопла и длины козырька.

Для сравниваемых сопел $n = 2,5$. Величина $a_1 = 100$ для сопла с организованным входом потока и для обычного - 74.

IV

Для практических расчетов пневматической системы уборочных машин необходимо располагать данными о затратах энергии на работу пневмоуборочного сопла на чистом воздухе и на торфвооздушной смеси. В связи с этим были выполнены опыты по определению потерь давления в соплах различных модификаций. Зависимость потерь давления Δp от средней скорости U_c воздуха во входном отверстии сопла при различных длинах козырька подчиняется квадратичному закону сопротивления

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho}{2} U_c^2, \quad (7)$$

где ζ - коэффициент гидравлического сопротивления;

ρ - плотность воздуха.

Для исследованной модели сопла с входным отверстием $400 \times 40 \text{ мм}^2$ при изменении U_c от 23 до 44 м/сек оптимальным с точки зрения потерь давления оказался козырек длиной 125 мм, т.к. в этом случае вне зависимости от скоростного режима потери давления оказались наименьшими.

С целью получения обобщенных данных определен интерес представляют сведения о величинах коэффициентов гидравлического сопротивления сопла $\zeta_{\text{соп}}$ и входа $\zeta_{\text{вх}}$ в зависимости от режима течения потока и конструктивных особенностей входной части сопла. В общем случае коэффициент гидравлического сопротивления ζ , представляющий собой отношение потерь полного давления

на рассматриваемом участке воздуховода к динамическому давлению в сечении, где скорость воздуха будет наибольшей, при турбулентном течении потока от его скорости не зависит. Согласно результатам настоящего исследования коэффициент гидравлического сопротивления входной части сопла больше, чем для всего сопла и оба они практически не зависят от скорости воздуха во входном отверстии сопла. При оборудовании входной части сопла козырьком коэффициенты гидравлического сопротивления $\zeta_{\text{соп}}$ и $\zeta_{\text{вх}}$ уменьшаются по сравнению с соплом без козырька.

Исходя из наименьших потерь давления и коэффициентов гидравлического сопротивления, для исследований с целью организации потока перед входным отверстием была принята модель сопла с козырьком $L = 125$ мм.

Установлено, что интенсивность нарастания $\zeta_{\text{соп}}$ и $\zeta_{\text{вх}}$ по мере увеличения β у сопел с $L = 125$ и 150 мм в диапазоне $\beta = 0 + 35^\circ$ имеет более монотонный характер, чем у сопел с $L = 85$ и 175 мм. Указанное свидетельствует о том, что и в этом случае козырек имеет оптимальную длину, которая для исследуемого сопла лежит в пределах $125 + 150$ мм.

Таким образом, анализируя результаты проведенных опытов, можно заключить, что увеличение длины козырька при прочих одинаковых размерах сопла и всасывающей его части оказывает существенное влияние на потерю давления и коэффициент гидравлического сопротивления. Причем потеря давления во всасывающей части обычного сопла при изменении длины козырька L от 0 до 175 мм превышает потерю давления для сопла в целом. Это же относится и к коэффициентам гидравлического сопротивления. Такое явление может быть объяснено взаимным влиянием местных сопротивлений сопла, представляющего собой воздуховод сложной конфигурации.

Спрямляющие решетки, использованные для выравнивания всасывающего факела пневмоуборочного сопла по его ширине, дали положительный эффект и с точки зрения потерь давления, причем потери давления для сопла в целом оказались больше потерь давления на входе. Это произошло в результате улучшения условий входа воздушного потока за счет установки спрямляющих решеток.

Экспериментально было обнаружено, что выдвигание направляющих пластин под козырек приводит к резкому снижению потерь давления в сопле и входной его части. Боковые направляющие пластины,

образованные продолжением стенок сопла с организованным входом потока (вариант 1), в дальнейших опытах были изъяты, т.к. во время пневматической уборки торфа системой сопел необходимо вести обработку расстила по всей ширине захвата машины. Эти сопла (вариант 2) были использованы для проведения основной серии опытов по определению потерь давления. Опытные и расчетные данные сведены в табл. 2.

Обычное сопло с оптимальной длиной козырька и сопло с организованным входом потока исследовались при работе на торфовоздушной смеси. Опыты были проведены с низинным фрезерным торфом со степенью разложения $R = 35\%$ и верховым с $R = 20\%$. Концентрация смеси μ колебалась в пределах от 0,21 до 1,74 кг/кг. Анализ полученных данных показывает, что потери давления при работе на смеси обычного сопла превышает таковые для сопла с организованным входом потока и подчиняется общепринятой закономерности

$$\Delta p_{см} = \Delta p_0 (1 + k\mu), \quad (8)$$

где Δp_0 - потеря давления при движении чистого воздуха;
 k - коэффициент дополнительной потери давления, обусловленной наличием в несущей среде торфяных частиц.

В результате математической обработки опытных данных оказалось, что потеря давления на чистом воздухе во время пневматической уборки торфа примерно в 1,13 раза больше у обычного сопла по сравнению с соплом, под козырьком которого установлены направляющие пластины.

Для объяснения сущности процесса организации потока воздуха перед входом в сопло представляет интерес изучение характера изменения потерь давления во входной части сравниваемых сопел при работе их на смеси. Экспериментальное определение этих потерь проводилось одновременно с определением перепада давлений для всего сопла. Зависимость $\Delta p_{см} = f(\mu)$ для входной части сравниваемых сопел подчиняется закономерности (8), которая в рассматриваемом случае имеет вид:

$$\Delta p_{см\ вх} = 69,1 (1 + 0,56\mu) \quad (9)$$

Таблица 2

Входная часть сопла с организованным входом							
№ скоростного режима	U_c , м/сек	Δp , кг/м ²		δ , %	σ_0 , кг/м ²	ζ	
		опыт	расчет			опыт	расчет
1	2	3	4	5	6	7	8
1	44,6	20,5	19,7	3,9		0,17	
2	42,0	16,8	17,4	3,6		0,16	
3	37,4	15,7	13,9	11,5	1,4	0,18	0,17
4	28,4	9,1	8,0	12,1		0,19	
Входная часть обычного сопла							
1	43,3	108,5	108,1	0,4		0,96	
2	40,9	95,7	96,2	0,5	0,3	0,95	0,95
3	36,6	78,0	77,0	1,3		0,97	
4	28,2	44,5	45,7	2,7		0,93	
Сопло с организованным входом потока							
1	44,6	46,4	39,8	14,2		0,39	
2	42,0	39,4	35,3	10,4	4,8	0,37	0,33
3	37,4	29,4	28,0	4,7		0,35	
4	28,4	18,9	16,1	14,8		0,39	
Сопло обычное							
1	43,3	86,3	85,9	0,5		0,76	
2	40,9	76,4	76,6	0,3		0,76	
3	36,6	56,6	61,3	8,3	2,7	0,70	0,76
4	28,2	34,9	36,4	1,4		0,73	

- для входной части обычного сопла и

$$\Delta p_{сн вх} = 54,7 (1 + 0,66\mu) \quad (10)$$

- для входной части сопла с организованным входом.

Отсюда следует, что эффект от установки пластин под козырьком сопла наиболее сильно проявляется во входной его части. Так, потеря давления на чистом воздухе во входной части сопла с организованным входом потока составила $54,7 \text{ кг/м}^2$, а для входной части обычного сопла - $69,1 \text{ кг/м}^2$, т.е. на 26,3% больше.

В этом случае $k = 0,66$, т.е. больше, чем для входной части обычного сопла ($k = 0,56$). Это обусловлено значительным снижением скорости U_c , необходимой для обеспечения той же концентрации смеси, что и при работе обычного сопла, от чего доля влияния транспортируемого материала в суммарной потере давления с увеличением μ до $1,74 \text{ кг/кг}$ возрастает для рассматриваемого случая примерно на 18%.

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что суммарные потери давления во входной части сопла с организованным входом потока при его работе на смеси ($\mu = 1,5 + 2,0$) примерно на 30% меньше по сравнению с обычным соплом. В результате сравнения вычисленных по формуле (8) значений $\Delta p_{сн}$ с опытными установлено, что относительные отклонения только в восьми случаях из 62-х превышают 10%, а среднеквадратические отклонения $\sigma_o < 0,1 \Delta \bar{p}_{сн}$, где $\Delta \bar{p}_{сн} = \sum \Delta p_{сн} / N$ - условная средняя потеря давления; N - число опытов.

Качество пневматической уборки торфа, производительность и энергетические показатели пневмоуборочных машин в большой степени зависят от соотношения между скоростью воздушного потока перед входом в сошло и скоростью перемещения машины.

Подбор частиц соплом, которое перемещается со скоростью U , происходит, когда частица за время нахождения в зоне рабочей скорости потока ($X \leq l_p$) разгоняется до скорости $V \geq U$

Величина осевого расстояния X может быть определена из уравнения движения частицы в горизонтальном потоке

$$m \frac{dv}{dt} = \beta_1 = c \frac{\rho}{2} F v^2 \quad (11)$$

где C - коэффициент лобового сопротивления; $\rho = \gamma/g$ - плотность воздуха; F - площадь миделевого сечения; $v_{\text{отн}} = v_x + u - v$ - скорость частицы относительно потока; v и v_x - горизонтальные составляющие соответственно абсолютной скорости частицы и воздушного потока; $m = G/g$ - масса частицы; G - вес частицы; g - ускорение силы тяжести.

Обозначим скорость движения сопла относительно частицы $y = u - v$, тогда элементарное перемещение частицы относительно сопла $dx = y \cdot dt$. Преобразуем уравнение (II)

$$\frac{dy}{dx} = -K \frac{(v_x + y)^2}{y^2}, \quad (12)$$

где $K = \frac{C \rho F}{2g} = \frac{\gamma}{v_s^2}$ - коэффициент парусности; v_s - скорость витания.

Уравнение (12) в общем случае, когда $v_x = f(x)$, не интегрируется, поэтому для его решения была использована аналоговая вычислительная машина МНБ-1.

Изменение горизонтальной составляющей осевой скорости воздушного потока перед входом в сопло при наличии зазора между нижней кромкой входного отверстия и поверхностью расстила выражается эмпирической формулой

$$v_x = 2,24 v_c (0,30 - \sqrt[4]{x^3}). \quad (13)$$

Полученные с помощью АВМ удаления l частиц от входа в сопло в зависимости от скорости и перемещения сопла хорошо согласуются с результатами скоростной киносъемки процесса пневматического подбора шарообразных торфяных частиц.

На модели сопла были определены скорости v_p воздушного потока, при которых частицы, имеющие $v_s = 10 \div 30$ м/сек, перестают уравниваться аэродинамической подъемной силой:

$$v_p = 3,3 + 0,2 v_s. \quad (14)$$

Зависимостями (13) и (14) определяется зона рабочей скорости воздушного потока

$$l_p = 0,34 \sqrt[3]{\left(0,66 - \frac{3,3 + 0,2 v_s}{v_c}\right)^3}. \quad (15)$$

Анализ полученных данных показывает, что отношение максимальной скорости машины к средней скорости воздушного потока во входном отверстии сопла для одного и того же материала ($U_s = const$) не зависит от скорости U_c при изменении ее в пределах от 20 до 35 м/сек. Для частиц, характеризующихся различными U_s , наибольшая скорость перемещения сопла по расстилу может быть определена по формуле

$$U_{\text{макс}} = 0,028 \cdot U_c \left[3,1 - (U_s - 10)^{0,29} \right] \quad (16)$$

Полученная в результате исследования математической модели формула (16) может быть использована для приближенного определения скорости движения пневмоуборочной машины.

У1

На основе изложенного в работе экспериментально обоснованы оптимальные размеры элементов входной части сопла комбайна БПФ и осуществлена организация потока воздуха перед входной частью этого сопла.

Для этого первоначально были выполнены опыты по определению спектра всасывания серийного сопла комбайна БПФ (длина козырька $L = 50$ мм). Рассмотрение полученного спектра показало, что зона действия всасывающего факела сопла комбайна БПФ недостаточна, т.к. осевое расстояние X , на котором получена скорость $U_x = 15$ м/сек, необходимая для устойчивого подбора фрезерного торфа из расстила, составило примерно 200 мм.

После снятия спектра всасывания сопла комбайна БПФ были проведены опыты по определению оптимальной, с точки зрения потерь давления, длины козырька. Результаты этих опытов для скорости воздуха во входном отверстии сопла $U_c = 44,5 + 47,7$ м/сек сведены в табл.3.

Из анализа полученных данных вытекает, что наименьшие потери давления для сопла и входной его части соответствуют длине козырька $L = 100$ мм.

Результаты исследования аэродинамики входной части сопла с оптимальной длиной козырька показали, что кривые равных скоростей имеют более плавное очертание, а активная зона всасывающего факела увеличивается в среднем на 50 мм.

Таблица 3

№	Длина козырька L , мм	Потеря давления Δp , кг/м ²		Коэффициент гидрав- лического сопротив- ления ξ	
		Входная часть соп- ла	Сопло в целом	Входная часть соп- ла	Сопло в целом
Сопло обычное					
1	50	164	96	1,2	0,7
2	75	166	117	1,9	1,3
3	100	114	98	0,9	0,7
4	125	185	121	2,4	1,6
5	150	181	120	2,5	1,7
6	175	217	133	4,8	3,0
Сопло с организованным входом потока (II направляющих пластин)					
7	100	102	101	0,8	0,8
Сопло с организованным входом потока (I9 направляющих пластин)					
8	100	96	94	0,7	0,7

В рассматриваемом случае произошло также некоторое выравнивание скоростей воздуха по ширине входной части сопла, однако его нельзя признать достаточным из условий равномерности подбора фрезерной крошки. Поэтому с целью устранения и этого недостатка сопло с оптимальной длиной козырька было оборудовано направляющими пластинами, т.е. была проведена организация потока воздуха перед входной частью сопла.

Опыты были проведены с двумя модификациями этого сопла. В первом случае под козырьком было установлено II направляющих пластин, во втором - I9. С точки зрения потерь давления лучшим оказалось сопло с I9-тью направляющими пластинами, равномерно распределенными под козырьком сопла (табл.3). В этом случае потери давления на входе для сопла с организованным входом пото-

ка составили 96 кг/м^2 , а для серийного сопла комбайна БПФ - 164 кг/м^2 , т.е. в 1,7 раза больше.

Изучение характера подбора фрезерного торфа из расстила с помощью сопла с организованным входом потока показало его более удовлетворительную работу по сравнению с соплом комбайна БПФ. Так, площадь поверхности, обрабатываемая неподвижным соплом, увеличилась примерно на 30%, контур всасывания оказался плавно очерченным и относительно равномерным по ширине сопла, всасывание фрезерного торфа осуществлялось без стягивания его к аэродинамической оси сопла. Сопла с организованным входом потока были установлены на два пневмокомбайна БПФ и испытаны в производственных условиях на торфопредприятиях "Смолевичское" и "Березинское" МТП БССР в сезоне 1970 г. Обработка данных, полученных в производственных условиях, показала, что объем торфа, убранного экспериментальными соплами, увеличился примерно на 25-30% по сравнению с соплами заводского изготовления.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что увеличение длины козырька сопла комбайна БПФ до 100 мм и установка под этим козырьком направляющих пластин способствуют более полному использованию энергии воздушного потока и обеспечивают относительно равномерный расход воздуха по ширине входного отверстия сопла, в результате интенсивность перемешивания потока уменьшается, а направленность его улучшается. Лучшая аэродинамическая характеристика такого сопла позволит увеличить сборы фрезерного торфа и сократить затраты энергии на пневматическую уборку торфа за счет увеличения производительности пневмокомбайна БПФ и уменьшения потерь давления в соплах.

В ы в о д ы

Выполненное экспериментальное исследование позволило изучить влияние конструктивных элементов всасывающей части сопла на форму спектров всасывания, характер кривых затухания скорости потока перед входным отверстием сопла и улучшить аэродинамику пневматических сопел, предназначенных для уборки фрезерного торфа из расстила. Полученные результаты дают основание сделать следующие выводы:

1. Разработана методика и предложена конструкция прибора для одновременного определения контура всасывающего факела и спектра скоростей у входного отверстия сопла.

2. Показано, что конструкция входной части сопла играет определяющую роль в организации потока воздуха и предопределяет размеры и форму всасывающего факела.

3. Установлено, что в результате взаимодействия всасывающих факелов смежных сопел происходит деформация потока и результирующий факел уменьшается.

4. Форма кривых равных скоростей перед входом в сопло и величина зоны действия всасывающего факела определяются длиной козырька над входным отверстием.

5. Высота расположения плоскости спектра всасывания и расход воздуха не оказывают влияния на изменение безразмерной осевой скорости потока перед входным отверстием сопла.

6. Интенсивность затухания безразмерных осевых скоростей горизонтального потока перед входом в пневмооборочное сопло определяется длиной козырька и углом наклона аэродинамической оси всасывающей части сопла. Зависимость безразмерной осевой скорости потока от расстояния до нижней кромки входного отверстия в общем виде выражается формулой (2), параметры которой определяются конструктивными размерами входной части сопла.

7. Получены формулы (3), (4) и (5) для определения осевых скоростей горизонтального потока перед входным отверстием сопла. Эти зависимости могут быть также использованы для определения оптимальных длин козырька и угла наклона всасывающей части сопла пневмооборочной машины при заданном законе изменения осевой скорости потока перед входным отверстием сопла.

8. Определены потери давления в соплах с различным конструктивным оформлением всасывающей части и показано, что величина потерь давления в сопле и входной его части зависит при прочих равных условиях от длины козырька над входным отверстием сопла; с изменением размеров входной части сопла меняется и оптимальная длина козырька.

9. Предложена конструкция входной части сопла с организованным входом потока и установлено, что наличие направляющих пластин под козырьком сопла снижает потери давления на вход и значительно увеличивает активную зону всасывающего факела.

10. В результате исследований работы моделей обычного сопла и сопла с организованным входом потока на торфовоздушной смеси найдена доля участия убираемого фрезерного торфа в суммарных потерях давления и показано, что потери давления в сопле с организованным входом при его работе на смеси на 30% меньше по сравнению с обычным соплом. Найдены значения коэффициента k , характеризующего участие транспортируемого материала в суммарных потерях давления сравниваемых сопел.

11. Составлена общая математическая модель движения одиночной частицы перед входным отверстием сопла; получены расчетные зависимости (I0) и (II) для определения поступательной скорости уборочной машины и длины рабочей зоны всасывающего факела и установлено, что отношение максимальной скорости машины к средней скорости воздушного потока во входном отверстии сопла для одного и того же материала не зависит от средней скорости $U_{\text{ср}}$ во входном отверстии сопла при изменении ее в пределах от 20 до 35 м/сек.

12. Лабораторно-стендовые исследования и их результаты были использованы при проектировании сопел с организованным входом потока для пневмовалкователя ПВПГ-1/4,8 и комбайна БФ.

13. Применение сопел с организованным входом потока на комбайне БФ обеспечивает увеличение сбора фрезерного торфа примерно на 30%.

Прикладное значение результатов исследования не ограничивается только соплами пневмоуборочных торфяных машин для уборки и валкования фрезерного торфа, их можно использовать и при проектировании сопел (насадков) промышленных и бытовых пылесосных установок.

Основное содержание работы доложено на ХХП, ХХШ, ХХУ, ХХУІ и ХХУІІ научно-технических конференциях Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института, на научно-технической конференции молодых ученых Белоруссии в 1969г., на республиканской научно-технической конференции работников торфяной промышленности БССР в 1969г. и опубликовано в следующих статьях:

І. Волкус С.П., Кислов Н.В., Нагорский И.С. Моделирование движения частиц у входа в сопло пневмоуборочной машины. Известия вузов СССР - "Энергетика", № 7, 1966.

2. Волкус С.П. Определение спектра всасывания сопла пневмокомбайна БПФ. Сб. "Увеличение производительности и надежности работы пневмокомбайнов БПФ. ИНТИП при Госплане БССР, Минск, 1967.

3. Волкус С.П., Кислов Н.В., Нагорский И.С. О спектре всасывания сопла пневмооборочной машины. Сб. научных трудов БПИ № 2 "Машиностроение и металлообработка", Минск, 1968.

4. Волкус С.П., Кислов Н.В., Нагорский И.С. Улучшение всасывающих факелов сопел комбайна БПФ. Сб. "Усовершенствование технологических процессов в торфяной промышленности БССР", Минск, 1968.

5. Волкус С.П., Нагорский И.С., Кислов Н.В. Сопло с организованным входом потока. Ж. "Промышленность Белоруссии", 1968, №10.

6. Нагорский И.С., Волкус С.П., Кислов Н.В. Применение аналоговой вычислительной машины для решения задач торфяной механики. Сб. научных трудов БПИ № 2 "Машиностроение и металлообработка", Минск, 1968.

7. Кислов Н.В., Волкус С.П. Исследование потока воздуха перед входом в сопло. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых ученых Белоруссии. Минск, 1969.

8. Кислов Н.В., Волкус С.П. Усовершенствование сопла пневмооборочных торфяных машин. Сб. "Автоматизация и механизация производственных процессов на предприятиях Министерства торфяной промышленности БССР". Минск, 1970.