

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВСАСЫВАЮЩЕГО СОПЛА ТОРФЯНОЙ ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, Д.М. ЩЕРБАКОВА

Тверской государственной технической университет,  
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., Щербакова Д.М., 2020

Добыча фрезерного торфа пневмоуборочным комплексом машин, в отличие от механического метода, обладает рядом достоинств: исключается подфрезеровывание влажной торфяной залежи при уборке, сокращается номенклатура требуемой техники и укорачивается с двух до одного дня длительность цикла. Последнее особенно важно, поскольку двухдневных периодов с хорошей солнечной погодой в сезоне добычи гораздо меньше, чем однодневных. Поэтому в целом надежность метода с пневматической уборкой торфа выше. Для оценки эффективности работы современной пневмоуборочной машины КТТ-2 был проведен полевой эксперимент по оценке скорости всасывания сопла машины. Результаты исследования дали возможность построить поле скоростей всасывающего факела и определить максимальную скорость на всасывании – 26,74 м/с. Минимальная скорость воздушного потока в исследуемой зоне составляет 0,3 м/с и наблюдается при удалении от сопла на расстоянии 0,5 м. Анализ поля скоростей всасывающего факела позволил выявить зависимость скорости воздушного потока от расстояния удаления от сопла. Выявлен размер активной зоны всасывающего факела и предложены пути оптимизации ее размеров.

*Ключевые слова:* торф, погодные условия, пневмоуборочная машина, всасывающий факел, сопло, активная зона, фракционный состав, анемометр.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-40-50**

### ВВЕДЕНИЕ

Отечественная продукция, изготовленная на основе фрезерного торфа, пользуется устойчивым спросом как на российском рынке, так и за рубежом [1, 2]. При этом добыча торфа осуществляется как механическим, так и пневматическим методом, известным еще с 1930-х годов. Самоходные и прицепные пневмоуборочные машины производились ранее из черного металла и имели большие массу и габаритные размеры [3].

Явное преимущество пневматического метода уборки заключалось в том, что продолжительность цикла производства торфа составляла один день вместо двух. Поскольку однодневных промежутков с хорошими погодными условиями в течение сезона больше, чем двухдневных, надежность этого метода была выше [4]. Однако 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. Только 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, этот метод обрел вторую жизнь, так как обеспечил минимизацию потерь торфа, отсутствие подфрезеровывания влажной залежи при уборке, ограниченной номенклатуре необходимого оборудования [5].

В России сегодня нет собственного производства пневмоуборочных машин, поэтому торфодобывающие компании закупили и используют белорусские машины МПГУ-30 производства РУП «Могилевэнерго» и КТТ-2 производства эстонской фирмы Kruviks OU (рис. 1). Эти машины являются однотипными и различаются лишь в деталях.



Рис. 1. Внешний вид прицепной пневмоуборочной машины КТТ-2

Мнение ряда руководителей торфодобывающих компаний о том, что указанные выше машины могут собирать не все виды торфа (в частности, трудности возникают при уборке переходных и низинных торфов высокой степени разложения), породило необходимость в проведении экспериментального исследования, цель которого – оценка всасывающей способности одного из данных аппаратов. Для изучения был выбран аппарат, работающий на предприятии ООО «Пиндstrup» в Псковской области. Результаты этого исследования и выводы представлены в данной статье.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Всасывание фрезерной крошки в основном производится соплами без принудительной активизации расстила и обеспечивается разностью вакуумметрического давления, создаваемого вентилятором в пневмосистеме машины и атмосферного давления окружающей среды [6, 7]. Благодаря этому воздух засасывается в сопло и увлекает за собой частицы торфа, расположенные в зоне действия всасывающего факела. На частицы торфа при этом действуют сила веса, подъемная сила, сила трения и сила давления воздушного потока [8], от соотношения величин которых и зависит возможность и интенсивность всасывания. Сила давления воздушного потока должна обеспечивать создание подъемной силы и преодоление силы веса и касательной силы трения. В противном случае всасывание происходит не будет.

Скорость воздушного потока по мере удаления от сопла постепенно уменьшается, разделяя всю область всасывающего факела на две зоны – активного и пассивного действия. Исследованиями Л.О. Горцакаляна и др. [6, 7, 9 и др.] определена необходимая скорость воздушного потока на входе в сопло (25...35 м/с). М.П. Калинушкиным по результатам исследований 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:

$$V_x = \frac{V_0}{1 + \frac{10x^2}{S}},$$

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.

В активной зоне скорость воздушного потока достаточна для преодоления сил трения, веса и создания подъемной силы частицы торфа. В пассивной зоне, ввиду гораздо меньшей скорости воздушного потока, не обеспечивается создание подъемной силы. И хотя материал транспортируется во взвешенном состоянии или волоком, всасывания не происходит. Начало пассивной зоны обеспечено, как правило, скоростью воздушного потока около 12...15 м/с [9].

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 – скорость восходящего потока, при которой частица находится в состоянии невесомости, т.е. витает. Скорости витания торфяных частиц, в зависимости от их размеров, плотности и влаги, определяются экспериментально, например, на установке, описанной в работах [10, 11]. При проектировании вертикального участка скорость транспортирования частиц принимается на 20...50 % больше скорости витания наиболее крупных частиц, а горизонтального участка – в два раза больше расчетной скорости витания.

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 скоростное поле всасывающего факела пневмоуборочной машины КТТ-2.

Для измерения скорости воздуха применялся портативный термоанемометр GM8903, имеющий возможность совмещения с персональным компьютером и диапазон измеряемой скорости от 0,3 до 30 м/с при точности измерения  $\pm 3$  %. Для проведения исследований и снятия показаний скорости потока перед всасывающим соплом, была использована металлическая координатная сетка с шагом ячейки 100 мм, в узлах которой устанавливался выносной щуп прибора (рис. 2). Все показания снимались с пятикратной повторяемостью.

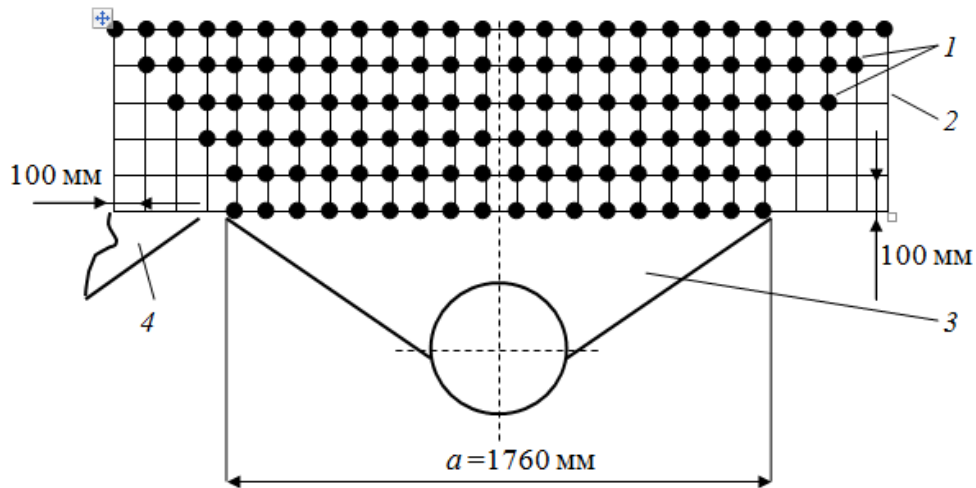


Рис. 2. Схема измерения скорости воздушного потока термоанемометром:  
 1 – точки (узлы) снятия показаний; 2 – координатная сетка;  
 3 – всасывающее сопло; 4 – соседнее всасывающее сопло

Для оценки влияния на скорость воздушного потока воздействия соседнего сопла это сопло отгораживалось воздухонепроницаемой перегородкой (рис. 3) и в журнал проведения эксперимента заносились показания с влиянием и без влияния на скорость воздушного потока соседнего сопла.



Рис. 3. 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 °С.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отображение данных измерений и вычислений поля всасывания в виде изотак, как это традиционно делалось при исследовании пневматических машин, 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 нами в виде графика зависимости скорости воздушного потока при всасывании от координаты расположения точки по длине сопла и по удалению от него по оси факела (рис. 4).

Ввиду ограниченности объемов статьи поле всасывания по правому соплу пневмоуборочной машины не приведено, но никаких новых обстоятельств и закономерностей при анализе полученных данных не было выявлено, графики практически полностью зеркальные.

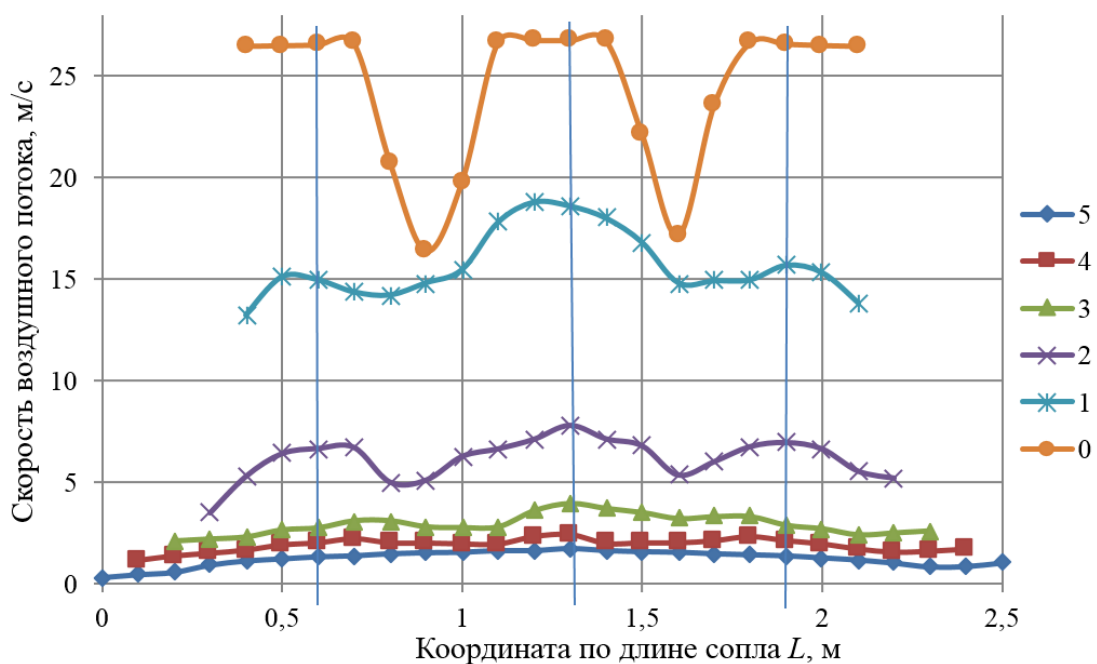


Рис. 4. Зависимость скорости воздушного потока при всасывании левым соплом машины КТТ-2 от координаты по длине сопла и расстояния удаления точки от сопла по линии оси факела: 0 – скорость измерена на входе в сопло; 1 – удаление от сопла 0,1 м; 2 – 0,2 м; 3 – 0,3 м; 4 – 0,4 м; 5 – 0,5 м

Анализ графических зависимостей, отображенных на рис. 4, показал, что во всех кривых присутствуют две зоны «провала» скорости потока, объясняемые наличием воздухонепроницаемых усилительных ребер, связывающих нижнюю и верхнюю кромки стеклопластикового сопла (рис. 5).

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.





Рис. 5. Усилительное воздухонепроницаемое ребро, связывающее верхнюю и нижнюю кромки всасывающего сопла

Для трех осей всасывающего факела ( $L = 0,6; 1,3; 1,9$  м) (см. рис. 4) построены зависимости скорости воздушного потока от расстояния удаления от всасывающего сопла (рис. 6). Координаты данных осей выбраны из соображений снижения влияния на скорость воздушного потока боковых вертикальных стенок сопла и максимальной скорости воздушного потока. Анализ и аппроксимация данных с высокой точностью ( $R^2 \geq 0,977$ ) произведена показательными функциями, для каждой из которых получена математическая модель.

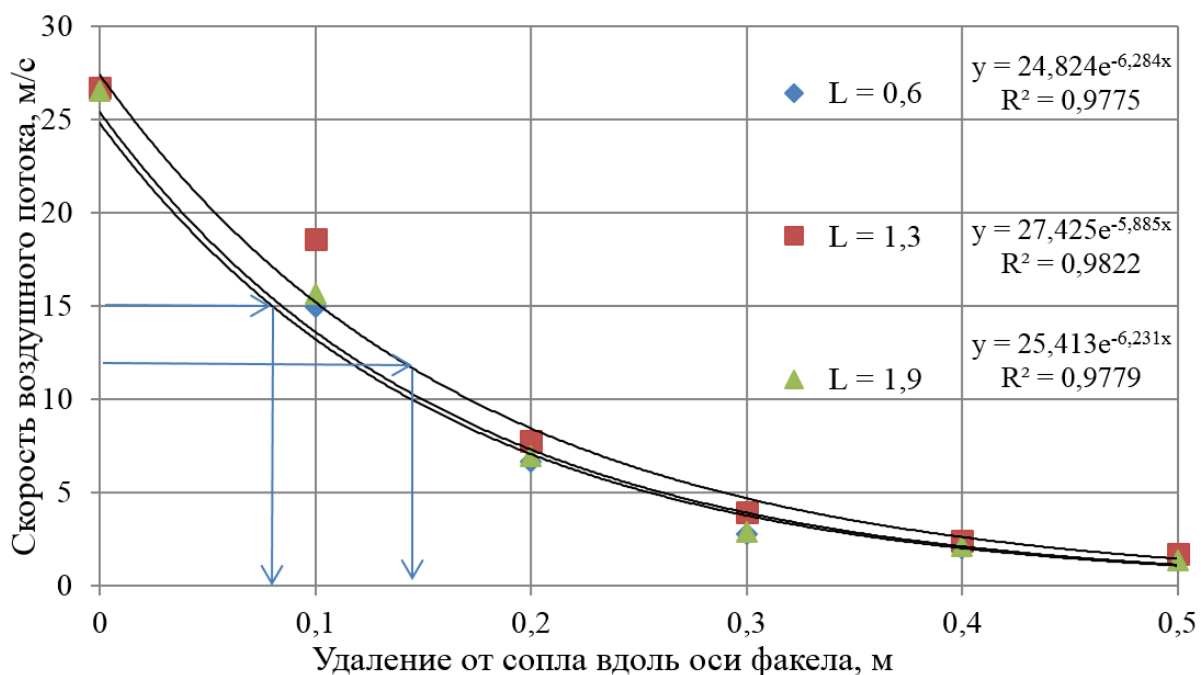


Рис. 6. Зависимость скорости воздушного потока от расстояния удаления от сопла

Для центральной оси сопла ( $L = 1,3$  м) произведено сравнение скоростей воздушного потока, полученных опытным путем и рассчитанное по выведенной

М.П. Калинушкиным формуле (представлена в начале статьи). Выявлено относительное расхождение между ними:

$$\Delta = \frac{|V_x - V_{оп}|}{V_x} \cdot 100 \%$$

Результаты опытов и расчетов сведены в таблицу.

Учитывая, что начало пассивной зоны всасывания ограничено скоростью воздушного потока 12...15 м/с, по рис. 7 определена длина активной зоны всасывающего факела при удалении от сопла, которая составила в данном случае 0,078...0,142 м.

Экспериментальные и расчетные данные 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 $V_x$ , м/с	$\Delta$ , %
	$L = 0,6$ 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

Полученная опытным путем максимальная скорость всасывания ( $V_1 = 26,74$  м/с) и небольшая зона активного действия всасывающего факела подтверждают возникновение трудностей при уборке более плотных видов торфа. Выход из данной ситуации (для увеличения продуктивности работы предприятия [12]) 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  $h_1 = 0,1$  м при площади живого сечения  $S_1 = ah_1 = 1,76 \cdot 0,1 = 0,176$  м<sup>2</sup>. Можно предположить, какая максимальная скорость всасывания будет у сопла такой же ширины, но с высотой входной щели, например, 0,08 м при площади сечения  $S_2 = ah_2 = 1,76 \cdot 0,08 = 0,1408$  м<sup>2</sup>. Тогда из уравнения неразрывности потока

$$V_2 = \frac{V_1 S_1}{S_2}$$

получаем  $V_2 = 33,425$  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 [13].

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

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследован всасывающий факел пневмоуборочной машины КТТ-2. Определено максимальное (26,74 м/с) и минимальное значение (0,3 м/с) скорости воздушного потока в исследуемой зоне.

2. Получены математические модели, описывающие зависимость скорости воздушного потока в точке от удаления ее от всасывающего сопла. Установлено, что расхождение опытных данных с теоретическими, рассчитанными на основании формулы М.П. Калинушкина, не превышает 10 %, что достаточно для инженерных расчетов.

3. Определена зона активного действия всасывающего факела при удалении от сопла (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, для чего следует провести дополнительные лабораторные исследования.

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 5. С. 105–117.

2. Lindsay R., Birnie R., Clough C. Commercial peat extraction // *IUCN UK Committee Peatland Programme Briefing Note*. 2014. №. 6. P. 1–5.

3. Соловьев К.Н., Яблонев А.Л. Экологические аспекты применения пневматического метода уборки фрезерного торфа // *Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии: сборник научных трудов и материалов III Международной научно-практической конференции (Тверь, 30 марта–2 апреля 2017 г.)*. Тверь: ТвГТУ, 2017. С. 316–319.

4. Chertkova E., Sizova V. Production and Technological Parameters of Milled Peat Extraction Depending on Organization of Peat Machines Operations // *E3S Web of Conferences: IV<sup>th</sup> International Innovative Mining Symposium*. 2019. V. 105. P. 01002.

5. 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. V. 9. No. 12. P. 89525.

6. Горцакалян Л.О., Чернышев В.В. Исследование скоростного поля всасывающего, нагнетательного и всасывающе-нагнетательного факелов активной сопла пневмоуборочной машины // *Технология и комплексная механизация торфяного производства: межвузовский тематический сборник*. Калинин: КПИ, 1977. С. 28–32.

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

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



9. Солопов С.Г., Горцакалян С.Г., Чернышев В.В. Определение минимальной скорости воздушного потока на входе во всасывающее сопло пневмоуборочной машины // *Механизация добычи торфа: сборник научных трудов*. М.: Недра, 1974. Вып. XVII (XIII). С. 5–9.

10. 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: материалы международной конференции / под общ. ред. Р.А. Ковалева*. Тула: ТулГУ, 2018. С. 117–124.

11. 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: материалы международной научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ. С. 137–141.

12. Singh K. Allocation and sustainable management of peat resources on public land // *AEP Public Land Management*. 2016. № 9. P. 1–14.

13. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование всасывающего факела торфяной пневмоуборочной машины КТТ-2 // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № S39. С. 47–58.

**Для цитирования:** Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование работы всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 40–49.

## STUDY OF THE OPERATION OF THE SUCTION NOZZLE OF PEAT PNEUMATIC HARVESTER

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., D.M. SCHERBAKOVA

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: alvovich@mail.ru

The extraction of milled peat by the pneumatic harvesting complex of machines has a number of advantages in contrast to the mechanical method. These advantages are as follows: the milling of wet peat deposits during harvesting is excluded, the range of required equipment is reduced, and the cycle time is shortened from two to one day. The latter is especially important, since two-day periods with good sunny weather in the production season are much less than one-day ones. Therefore, in general, the reliability of the method with pneumatic peat harvesting is higher. To evaluate the efficiency of the modern КТТ-2 pneumatic harvesting machine, a field experiment was conducted to evaluate the suction speed of the nozzle of the machine. The results of the study made it possible to build the velocity field of the suction torch and determine the maximum suction speed – 26.74 m/s. The minimum air flow velocity in the studied zone is 0.3 m/s and is observed at a distance of 0.5 m from the nozzle. An analysis of the velocity field of the suction torch revealed the dependence of the air flow velocity on the distance from the nozzle. The size of the active zone of the suction plume has been identified and ways to optimize its size have been proposed.

*Keywords:* peat, weather conditions, pneumatic harvesting machine, suction torch, nozzle, active zone, fractional composition, anemometer

## REFERENCES

1. Panov V.V., Misnikov O.S., Kuporova A.V. Problems and Prospects for Peat Production in the Russian Federation. *Gorniy Informatsionno-analitichesky byulleten*. 2017. No. 5, pp. 105–117. (In Russian).
2. Lindsay R., Birnie R., Clough C. Commercial peat extraction. *IUCN UK Committee Peatland Programme Briefing Note*. 2014. No. 6, pp. 1–5.
3. Solovyov K.N., Yablonev A.L. Environmental aspects of milled peat pneumatic harvesting method. *Actual problems of life safety and ecology: a collection of scientific papers and materials III International scientific and practical conference*. Tver: TvGTU, 2017, pp. 316–319. (In Russian).
4. Chertkova E., Sizova V. Production and technological parameters of milled peat extraction depending on organization of peat machines operations. *E3S Web of Conferences: IV<sup>th</sup> International Innovative Mining Symposium*. 2019. V. 105, p. 01002.
5. 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. V. 9. No. 12, pp. 89525.
6. Gortsakalyan L.O., Chernishov V.V. Study of the speed field of the suction, pumping and suction-pumping torches of the active nozzle of the pneumatic harvester. *Papers of Intercollegiate Thematic Collection "Technology and complex mechanization of peat production"*. Kalinin: KPI, 1977, pp. 28–32. (In Russian).
7. Gortsakalyan L.O. Effect of the progressive speed of the pneumatic harvester on the change in the concentration of the aircraft mix. *Proceedings of the Kalinin Polytechnical Institute "Mechanization of Peat Extraction and Processing"*. Moscow: TsNIITestroymash, 1974. pp. 20–24. (In Russian).
8. Sobolev A.A., Melnik P.A., Tyutyunik A.O. Particle movement in the airflow. *Vektor Nauki TGU*. 2011. No. 3 (17). pp. 82–86. (In Russian).
9. Solopov S.G., Gortsakalyan L.O., Chernishov V.V. Determining the minimum air flow speed at the entrance to the suction nozzle of pneumatic harvester. *Scientific Works "Peat mining mechanization"*. Moscow: Nedra, 1974. V. XVII (XIII), pp. 5–9. (In Russian).
10. Yablonev A.L., Scherbakova D.M., Andrianova A.A. Experimental determination of the speed of peat particle soaring in air transport installations. *Materials of International Conference "Social-economic and Environmental Problems of Mining, Construction and Energy"*. Tula: TulGU, 2018. pp. 117–124. (In Russian).
11. Solovyov K.N., Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Study of the dependence of the parameters of the soaring of peat particles in air transport devices from the qualitative characteristics of milling crumbs. *Materials of International Conference "Problems and Prospects for Sustainable Development of Peat Business in Russia"*. Tver: TvGTU, 2018. pp. 137–141. (In Russian).
12. Singh K. Allocation and sustainable management of peat resources on public land. *AEP Public Land Management*. 2016. No. 9. pp. 1–14.
13. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Study of the suction torch of the peat pneumatic harvesting machine KTT-2. *Gorniy Informatsionno-analitichesky Byulleten*. 2019. No. S39. pp. 47–58. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 13.06.2020; после рецензирования/revised: 15.07.2020;  
принята/accepted 14.08.2020