

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331.002.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ УГЛА УСТАНОВКИ ФРЕЗЫ ТОРФЯНОГО БРОВКОРЕЗА

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, Н.М. ЖУКОВ, асп.

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22; e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., Жуков Н.М., 2023

Эффективность добычи фрезерного торфа во многом определяется качеством поверхности полей добычи – торфяных карт. При работе технологического оборудования вследствие выработки центральной части карты по краям образуются приканальные бровки – участки с возвышенным рельефом шириной 25–50 см. Они затрудняют удаление дождевых и талых вод, негативно влияют на производительность технологического оборудования. В ТвГТУ ведется разработка высокопроизводительного бровкореза, который за один проход мог бы срезать обе приканальные бровки в отличие от финского прототипа PRF-240, обрабатывающего за один проход лишь одну бровку. Одним из основных вопросов при создании бровкореза является нахождение оптимального угла установки фрез в поперечной плоскости, поскольку машина не должна производить забрасывание картовых каналов торфяной крошкой. Для обоснования угла установки фрез проведен комплексный лабораторный эксперимент, показавший, что оптимальным является угол установки фрез 20°.

Ключевые слова: торфяная карта, профилировщик краев, бровкорез, штифтовые ножи, косоугольное фрезерование, торфяная крошка, картовый канал.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-21-30

ВВЕДЕНИЕ

При фрезерном способе добычи торфа происходит постепенная (послойная) сработка торфяных полей (карт) [1, 2]. Однако приканальная часть площадок карт шириной 0,25–0,5 м не вырабатывается, так как это места повышенной влажности залежи и пониженной ее несущей способности [3], сильно осложняющие работу технологического оборудования. Образуются так называемые бровки, затрудняющие процесс добычи торфа и нарушающие ранее созданный выпуклый поперечный рельеф торфяных карт, необходимый для беспрепятственного удаления дождевых и вешних вод.

Поскольку поддержание ровного выпуклого рельефа является актуальной задачей, от качественного решения которой зависит весь последующий технологический процесс добычи торфа [4], то либо полностью профилируют поверхность карт заново большими шнековыми профилировщиками, либо срезают образовавшиеся бровки специальными машинами – бровкорезами. Полное профилирование поверхности – весьма энергозатратная операция [5], требующая большого количества времени и средств. Поэтому выполнение полного

профилирования поверхности карты после 4–5 циклов добычи весьма неэффективно. Менее энергозатратны различные бровкорезы, среди которых наибольшее распространение получила финская машина PRF-240 (рис. 1) [6].



Рис. 1. Фрезерный бровкорез PRF-240

Машина весьма компактная, мобильная (может быть доставлена к месту работы даже на прицепе легкового автомобиля), однако обрабатывает за один проход только один край карты (одну бровку).

Программа по импортозамещению требует налаживания производства отечественной высокопроизводительной техники. С этой целью нами проведены исследования по обоснованию параметров навесного бровкореза, способного обрабатывать за один проход оба края картового поля, которые примыкают к одному картовому каналу.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Одним из основных вопросов при исследовании было обоснование угла установки фрезы бровкореза по отношению к поперечной оси машины [7, 8]. С одной стороны, этот угол должен быть небольшим, чтобы предотвратить интенсивный рост энергоемкости процесса фрезерования бровок [9–11], значительное уменьшение ширины захвата машины и уменьшение боковых усилий, передающихся на ходовую часть машины, с другой – достаточным для того, чтобы при движении не происходило забрасывание торфяной крошкой прилегающего картового канала. Решение этого вопроса сопровождалось проведением серии лабораторных экспериментальных исследований. Значительно модернизирована фрезерная лабораторная установка [12], принадлежащая кафедре «Технологические машины и оборудование» ТвГТУ, оснащенная цифровым тензометрическим оборудованием ZetLab и имеющая возможность поворота фрезы на определенный угол, т. е. проведения исследований по косоугольному фрезерованию [13].

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2. Основой установки является вертикальная колонна 3, жестко заделанная в пол. Перемещение плиты 6 по колонне осуществляется винтом 1 со штурвалом 2, один оборот которого равен перемещению на 4 мм вверх или вниз. На плите смонтирован электродвигатель постоянного тока 7, приводящий во вращение фрезу 16 через муфту 8 и промежуточный вал 9. Плита с установленным на ней оборудованием имеет

возможность поворачиваться вокруг колонны на угол $\pm 45^\circ$. Рядом с колонной проходит рельсовый путь 10, по которому перемещается тележка 17 с закрепленным на ней монолитом торфа 4. Тележка приводится в движение лебедкой 15 с тросом 5 от электродвигателя 11 (частота вращения ротора 950 об/мин) через две коробки передач 12 и 13 с нейтральными передачами и редуктор 14 с передаточным отношением $i = 3,75$, имеет благодаря этому восемь скоростей – от 0,111 до 0,571 м/с. Система тиристорного электропривода позволяет изменять частоту вращения фрезы от 0 до 2 500 об/мин.

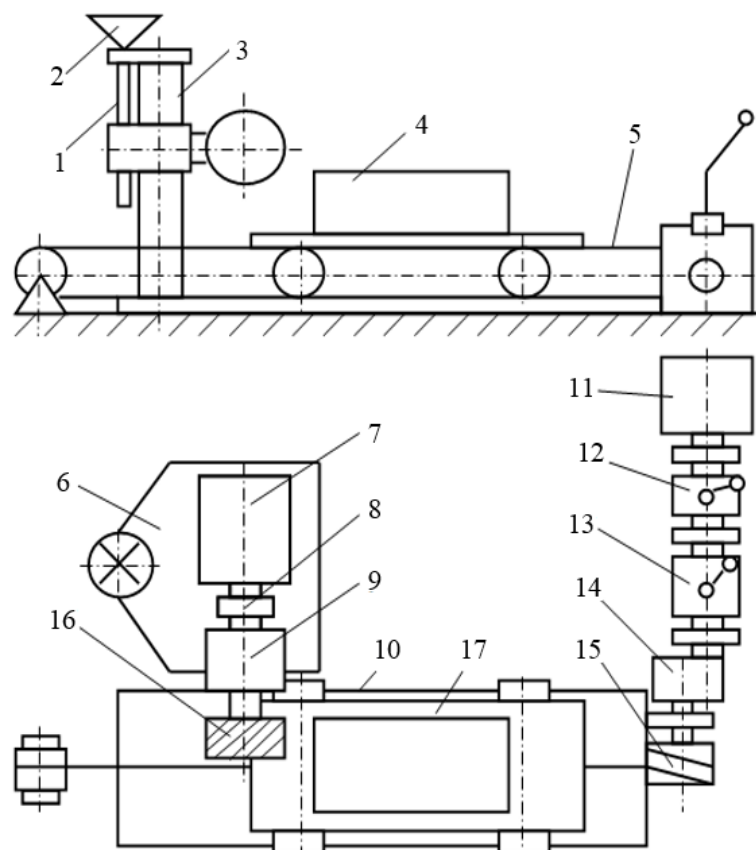


Рис. 2. Схема лабораторной установки для исследования косоугольного фрезерования

Установка оснащена пусковой и регулирующей аппаратурой, тахометром для измерения частоты вращения фрезы, S-образным тензодатчиком PST Loadcell, тензостанцией-анализатором Zet 017-T8, которая может применяться в широком диапазоне исследований и позволяет проводить фиксацию и анализ сигналов различных частот в реальном масштабе времени и сигналов, взятых из записей; измерять постоянную и переменную составляющие сигналов, переписывать их в файл с временной привязкой; регистрировать сигналы (вводить в память оцифрованные значения сигнала с последующей записью на накопитель) [14].

Фреза 1 установки (рис. 3) соединена с валом 2 ротора электродвигателя 3. Статор электродвигателя 4 установлен на балансирных опорах 5.

Момент сил сопротивления фрезерованию M_{ϕ} преодолевается электромагнитным моментом, действующим на ротор со стороны статора M_p :

$$M_{\phi} = M_p.$$

Реактивный электромагнитный момент стремится повернуть статор в направлении, противоположном направлению вращения ротора. Статор удерживается от поворота силой упругости S-образного тензодатчика PST 7, рассчитанного на измерение силы растяжения – сжатия. Один конец тензодатчика через тягу шарнирно закреплен к плите, а другой шарнирно связан с жестко прикрепленным к статору двигателя двуплечим рычагом 6 (рис. 3). Второй (свободный) конец двуплечего рычага используется для тарирования устройства в случае необходимости. Таким образом, на тензостанцию Zet 017-T8 передается изменяющееся вследствие деформации S-образного тензодатчика напряжение.

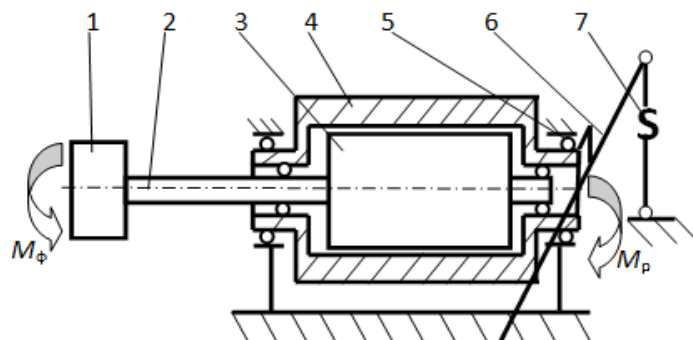


Рис. 3. Схема фиксации момента сопротивления фрезерованию

Реактивный момент на статоре двигателя M_p определяется по формуле

$$M_p = LF, \quad (1)$$

где L – длина плеча двуплечего рычага; F – упругое усилие, возникающее в тензодатчике, фиксируемое с помощью тензостанции Zet 017-T8.

Удельный расход энергии на фрезерование A , Дж/м³, высчитывается как соотношение мощности N_ϕ , Вт, и секундной производительности аппарата Q_ϕ , м³/с:

$$A = \frac{N_\phi}{Q_\phi} = \frac{M_\phi \omega}{B_A H w}, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения фрезы, с⁻¹; B_A – активная ширина захвата фрезы, м; H – глубина фрезерования, м; w – скорость движения тележки с монолитом, м/с.

Угловая скорость вращения фрезы, с⁻¹, находится по числу оборотов в минуту n , фиксируемому тахометром:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}. \quad (3)$$

Геометрическими параметрами фрезерования являются средняя толщина срезаемой стружки, подача фрезы на нож и угол контакта фрезы с торфяной залежью.

Средняя толщина срезаемой стружки δ_{cp} , м, вычисляется по формуле

$$\delta_{cp} = \frac{cH}{R\varphi_0}, \quad (4)$$

где c – подача фрезы на один нож, м; R – радиус фрезы по концам ножей, м; φ_0 – угол контакта фрезы с залежью, рад.

Подача на нож зависит от скорости поступательного движения тележки w , м/с, числа оборотов фрезы в минуту n , об/мин, и числа ножей в плоскости резания z , шт.:

$$c = 60w/nz.$$

Угол контакта фрезы с залежью φ_0 , °, определяется по формуле

$$\varphi_0 = \arccos \frac{R-H}{R} + \arcsin \frac{c}{2R}. \quad (5)$$

Следует отметить, что угол контакта фрезы с залежью из выражения (5), определяемый в градусах, в формулу (4) подставляется в радианах.

Возможность изменения различных параметров, таких как скорость вращения фрезы, скорость поступательного движения тележки с монолитом, а также наличие быстромонтируемых моделей фрез с ножами разных форм, позволяет выполнять опыты в значительных диапазонах изменяющихся параметров.

Для определения траектории движения фрезерной крошки проведен эксперимент на лабораторной фрезерной установке с фиксацией следов крошки на специальном экране. В ходе эксперимента из верхового торфа со степенью разложения 25–30 % был подготовлен торфяной монолит с заранее выполненной ручной сепарацией древесных включений, установлен экран. В дальнейшем монолит для формирования структурной прочности был заморожен при температуре от -5 до -3 °С (рис. 4).



Рис. 4. Подготовленный торфяной монолит

Экран для фиксации траектории полета крошки выполнен из полотна, закрепленного сзади фрезерной установки. Для наглядности и удобства фиксации следов крошки на экране после каждого опыта устанавливались чистые белые листы формата А1. На полотне установлена деревянная планка, условно изображающая край картового канала, совпадающий с торцовым краем фрезы (рис. 5).

Фрезерование осуществлялось при частоте вращения штифтовой фрезы 1 000 об/мин, совпадающей с частотой вращения фрезы профилировщика краев PRF-240, и скорости поступательного движения тележки 0,381 м/с. Угол поворота фрезы изменялся от 0 до 40° с шагом 5° при глубине фрезерования 8 мм.

Поскольку в ходе эксперимента угол установки фрезы изменялся, происходило и изменение активной ширины захвата фрезы. Это одно из негативных проявлений углового расположения фрезы, оценивать его предлагается коэффициентом использования ширины фрезы K_b , который определяется как отношение активной ширины захвата фрезы B_A к общей ширине фрезы B [15, 16].

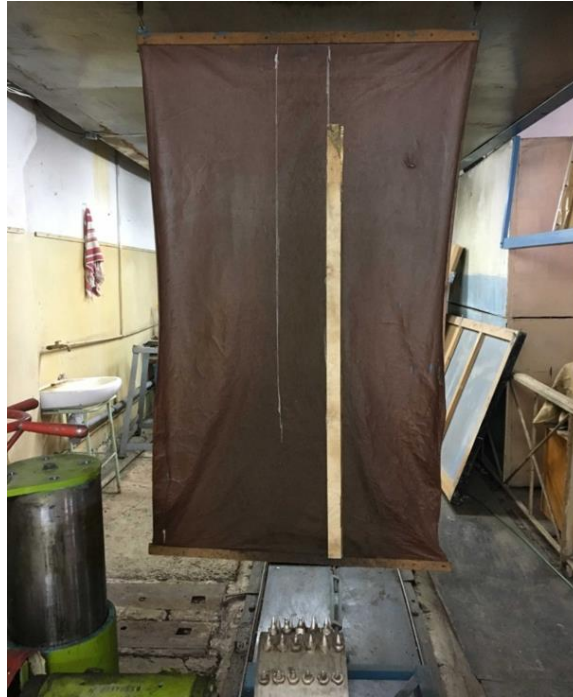


Рис. 5. Экран для фиксации траектории полета фрезерной крошки

Активная ширина фрезы B_A может быть найдена по упрощенной формуле

$$B_A = B \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

где B – общая ширина фрезы, мм; φ – угол установки фрезы в плане.







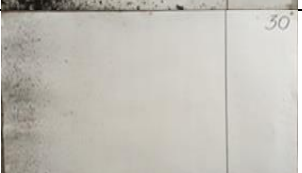


Определение энергоемкости фрезерования осуществлялось по графикам нагрузки F , снятым с помощью тензостанции Zet 017-T8 при девяти положениях фрезы с пятикратной повторяемостью опытов. При этом с целью исключения случайных составляющих производилось первое полировочное фрезерование для выравнивания монолита, после чего уже выполнялась основная серия экспериментов. Момент сил сопротивления фрезерованию определялся по формуле (1), угловая скорость вращения фрезы – по формуле (3), активная ширина захвата фрезы – по формуле (6), а удельная энергоемкость – по формуле (2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментов по оценке траектории полета торфяной крошки, коэффициента использования ширины захвата и средней удельной энергоемкости фрезерования при установке фрезы под углами от 0 до 40° представлены в таблице.

Как следует из анализа таблицы, уже при угле установки фрезы 20° на экране отсутствуют следы торфяной крошки, залетающей за черту (имитируемый край картового канала). Следовательно, по условию отсутствия забрасывания картового канала фрезерной крошкой угол установки фрезы $\varphi = 20^\circ$ к поперечной плоскости машины можно считать достаточным.

Результаты исследования косоугольного фрезерования торфяного монолита

Номер серии опытов	Угол установки фрезы φ , °	Фотография экрана	Коэффициент использования ширины фрезы K_B	Средняя удельная энергоёмкость фрезерования A , кДж/м ³
1	0		1,0	1,29
2	5		0,996	3,54
3	10		0,985	4,20
4	15		0,966	4,53
5	20		0,940	6,40
6	25		0,907	8,32
7	30		0,867	12,55
8	35		0,819	12,68
9	40		0,766	19,13

Зависимость коэффициента использования ширины фрезы от угла ее установки, полученная на основании данных таблицы, представлена на рис. 6.

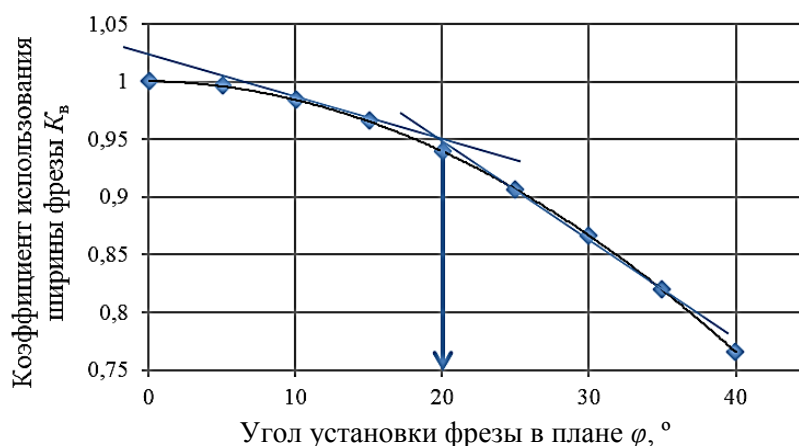


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования ширины фрезы от угла ее установки

Как видно из рис. 6, при увеличении угла установки фрезы более 20° начинается более интенсивное уменьшение активной ширины захвата, что может негативно сказаться на производительности фрезерующего агрегата.

Зависимость удельной энергоёмкости фрезерования торфяного монолита от угла установки фрезы, построенная на основании данных таблицы, представлена на рис. 7.

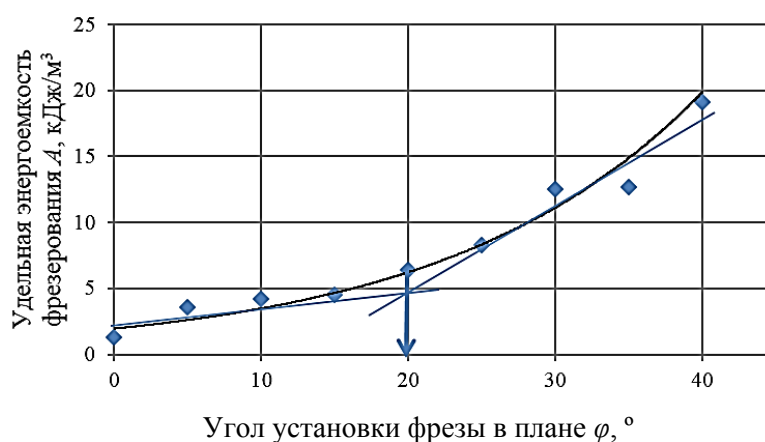


Рис. 7. Зависимость удельной энергоёмкости фрезерования от угла установки фрезы

Как видно из рис. 7, при увеличении угла установки фрезы более 20° начинается более интенсивное увеличение удельной энергоёмкости фрезерования, что также может негативно сказаться на всем производственном процессе.

Аппроксимация опытных данных позволила получить математическую модель, описывающую зависимость удельной энергоёмкости фрезерования от угла установки фрезы относительно поперечной оси при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,936$:

$$A = 1,95e^{0,058\varphi}.$$

Таким образом, сразу по нескольким критериям угол установки фрезы торфяного бровкореза 20° может считаться оптимальным – по отсутствию

забрасывания торфяной крошкой прилегающего картового канала, по интенсивности уменьшения активной ширины захвата фрезы и по интенсивности роста удельной энергоемкости фрезерования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальное исследование дало возможность обосновать оптимальный угол установки фрезы торфяного бровкореза, который по критериям отсутствия забрасывания торфяной крошкой прилегающего картового канала, интенсивностям уменьшения активной ширины захвата фрезы и роста удельной энергоемкости фрезерования составляет 20°.

Полученные результаты позволили обосновать конструкцию торфяного бровкореза, обрабатывающего за один проход обе бровки, прилегающие к картовому каналу. При этом в конструкции используются только стандартные детали и узлы, а поворот фрез на угол 20° осуществляется с помощью карданных шарниров [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Мисников О.С., Копенкина Л.В. Возникновение торфяного дела в России // *Горный журнал*. 2020. № 2. С. 95–99.
2. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра. 1985. 211 с.
3. Framing the Peat: The Political Ecology of Finnish Mire Policies and Law / O. Ratamáki [et al.] // *Mires and Peat*. 2019. V. 24 (17). P. 1–12.
4. Kozulin A., Tanovitskaya N., Minchenko N. Developing a National Strategy for the Conservation and Sustainable Use of Peatlands in the Republic of Belarus // *Mires and Peat*. 2018. V. 21. № 5. P. 1–17.
5. Zembrowski K., Dubowski A.P. Testing the Three-phase Technology for Harvesting Biomass from Wetlands // *Mires and Peat*. 2019. V. 25. № 2. P. 1–10.
6. MERIPEAT. URL: <https://www.meripeat.com/ru/products-ru/milled-peat-production-ru> (дата обращения: 02.11.2022).
7. Cheluszka P., Jagieła-Zajac A. Determining the Position of Pick Holders on the Side Surface of the Working Unit of the Cutting Machine in the Robotic Technology of their Assembly // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. № 261. P. 012003.
8. Medolago A., Melzi S. A Flexible Multi-body Model of a Surface Miner for Analyzing the Interaction between Rock-cutting Forces and Chassis Vibrations // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021. V. 31. Is. 3. P. 365–375.
9. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Записки горного института*. 2020. Т. 241. С. 58–67.
10. Фомин К.В., Рахутин М.Г. Моделирование повреждающих воздействий на режущих элементах рабочего органа фрезерующего агрегата при взаимодействии с торфом // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2019. № S39. С. 36–46.
11. Фомин К.В. Моделирование нагрузок на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата с учетом погрешности расстановки режущих элементов // *Горные науки и технологии*. 2022. Т. 7. № 2. С. 161–169.
12. Мисников О.С., Копенкина Л.В., Зюзин Б.Ф. Научные школы Московского торфяного института и их развитие в Тверском государственном техническом университете // *Горный журнал*. 2022. № 5. С. 9–22.

13. Патент РФ № 2755779. *Лабораторный стенд для исследования прямоугольного и косоугольного резания фрезой торфяных монолитов* / Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М.; Заявл. 30.12.2020. Оpubл. 21.09.2021. Бюл. № 27.

14. Яблонев А.Л. Цифровое тензометрирование при лабораторном исследовании процесса фрезерования торфяной залежи // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2018. № 1. С. 182–189.

15. Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Расчет момента сопротивления фрезерованию торфяной залежи при попадании фрезы на пень и определение активной ширины рабочего органа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 51–61.

16. Yablonev A.L., Misnikov O.S., Zhukov N.M. Analytical Calculation of the Coefficient of Increasing the Moment of Resistance to Milling the Ground when the Cutter Hits the Stump // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. № 2176. P. 012054.

17. Патент РФ на полезную модель № 180545. *Профилировщик краев торфяных карт* / Яблонев А.Л., Жуков Н.М., Гусева А.М.; Заявл. 12.03.2018. Оpubл. 18.06.2018. Бюл. № 17.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Экспериментальное обоснование угла установки фрезы торфяного бровкореза // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 21–30.

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE GRIP ANGLE OF THE PEAT EDGE CUTTER

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., N.M. ZHUKOV, postgraduate

Tver State Technical University

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

The efficiency of milled peat extraction is largely determined by the quality of the surface of the extraction fields – peat production fields. During the operation of technological equipment, due to the development of the central part of the field, near-channel edges are formed along the edges – areas with an elevated relief 25–50 cm wide. They make it difficult to remove rain and melt water, and negatively affect the performance of technological equipment. In TvSTU, work is underway to develop a high-performance edge cutter that could cut both channel edges in one pass, unlike the Finnish prototype PRF-240, which processes only one edge in one pass. One of the main issues when creating a brow cutter is to find the optimal angle of installation of the cutters in the transverse plane, since the machine should not throw peat chips into the peat production field channels. To justify the installation angle of the cutters, a complex laboratory experiment was carried out, which showed that the optimal installation angle of the cutters is 20°.

Keywords: peat production field, edge profiler, brow cutter, pin knives, oblique milling, peat chips, peat map field channel.

Поступила в редакцию/received: 11.12.2022; после рецензирования/revised: 18.12.2022;
принята/accepted: 25.12.2022