

# ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331.002.5

## РАСЧЕТ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ФРЕЗЕРОВАНИЮ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ ПРИ ПОПАДАНИИ ФРЕЗЫ НА ПЕНЬ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ ШИРИНЫ РАБОЧЕГО ОРГАНА

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

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

© Яблонев А.Л., Жуков Н.М., 2021

Одной из основных операций фрезерного способа добычи торфа является фрезерование. От качества его выполнения зависит сушка, а значит, и весь последующий технологический процесс производства. Наличие древесных включений в торфяной залежи сильно осложняет работу. Резко возросший момент нагружения, возникающий при попадании фрезы на пень, способен вывести из работоспособного состояния как элементы трансмиссии, так и привод фрезерующего агрегата. Поэтому на стадии проектирования необходимо учитывать динамические нагрузки, возникающие от встречи фрезы с древесными включениями. Попытки описать этот факт предпринимались ранее разными авторами, но в силу математических и методических ошибок не увенчались успехом. В данной статье сделана «работа над ошибками», которая позволила достичь необходимого результата.

*Ключевые слова:* фрезерование, торф, пнистость, древесное включение, фреза, нож фрезы, закон сохранения импульса, момент сопротивления фрезерованию, активная ширина фрезы.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-51-61**

### ВВЕДЕНИЕ

Фрезерование – один из ключевых и наиболее ответственных этапов при разработке торфяной залежи фрезерным способом. От качества его выполнения в целом зависит весь технологический цикл добычи фрезерного торфа, так как закладываются условия для последующей сушки расстила торфяной крошки [1].

Немаловажную роль в процессе фрезерования играет пнистость торфяной залежи, определяющая интенсивность столкновения фрезы с древесными включениями. При этом наблюдается мгновенное увеличение момента сопротивления фрезерованию и, соответственно, возросшие нагрузки во всей трансмиссии фрезерующего агрегата [2, 3]. Естественно, возникает вопрос о надежности и долговечности торфяных фрезерующих машин, которые значительно сокращаются [4]. Резко выраженный знакопеременный характер нагрузок способен молниеносно разрушить или вывести из работоспособного состояния рабочие и исполнительные органы, элементы трансмиссии и даже карданно-телескопическую передачу, по которой осуществляется передача крутящего момента от трактора-тягача к фрезерующему агрегату. Поэтому учет явлений столкновения с пнем совершенно

необходим на стадии проектирования машин. Кроме того, в случае косоугольного резания при расчете энергоемкости и мощности фрезерования требуется знать активную ширину рабочего органа (фрезы), взаимодействующего с торфяной залежью.

Указанные вопросы характерны не только для торфяной отрасли, но и для всех работ, связанных с фрезерованием грунта, дорожного полотна, горных пород, когда возникает встреча рабочего органа с более плотным и прочным включением [5].

Попытка теоретического рассмотрения вопроса столкновения фрезы с древесным включением в торфяной залежи уже была предпринята ранее [6, 7], однако в силу ошибок математического и методического характера не привела к успеху, поэтому в данной статье рассматривается вновь.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Опишем процесс послойно-поверхностного попутного фрезерования торфяной залежи фрезой, имеющей окружную скорость  $v$  и поступательную  $W$  (рис. 1). Для упрощения процесса взаимодействия фрезы радиусом  $R$  с древесным включением последнее считается жестко закрепленным в точке  $O$ . Под радиусом  $R$  понимается радиус инерции. Для полого тонкостенного цилиндра, каковым, по сути, и является фреза, радиус инерции равен радиусу наружной обечайки фрезы. От возникшего контакта фрезу подкидывает вверх, и она, подобно буксующему ведущему колесу, старается «переехать» через препятствие [8]. При этом фреза получает ударный импульс  $P$ , который раскладывается на две составляющие: горизонтальную и вертикальную, расположенные в направлении движения фрезера и вертикальной плоскости [9]. Контакт фрезы с пнем заканчивается через время  $\Delta t$ , с, когда радиус  $OC$  принимает вертикальное положение из-за поворота фрезы на некоторый угол  $\alpha$  относительно оси, проходящей через точку  $O$ .

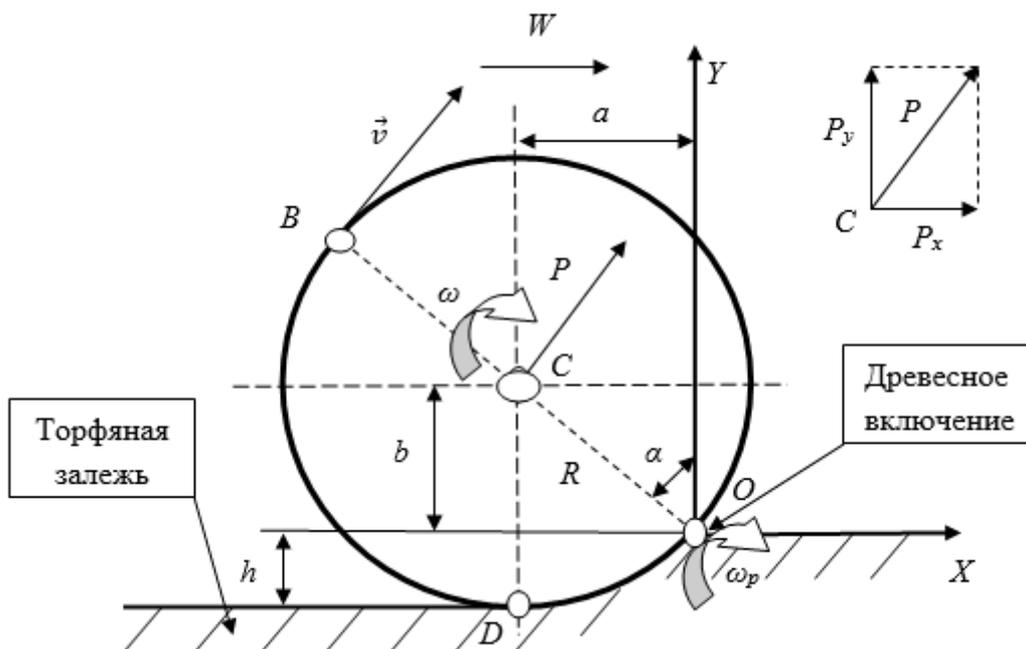


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия фрезы с закрепленным пнем

Согласно теореме об изменении количества движения

$$mv_{kx} - mv_{0x} = P_x; \quad (1)$$

$$mv_{ky} - mv_{0y} = P_y, \quad (2)$$

где  $m$  – масса фрезы, кг;  $v_{0x}$  и  $v_{0y}$  – начальные горизонтальная и вертикальная составляющие скорости центра тяжести  $C$  фрезы до удара, м/с;  $v_{kx}$  и  $v_{ky}$  – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости центра тяжести  $C$  фрезы после удара, м/с;  $P_x$  и  $P_y$  – горизонтальная и вертикальная составляющая импульса,  $[\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}] = [\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{с}^2] = [\text{Н}\cdot\text{с}]$ .

Соотношение между  $P_x$  и  $P_y$  можно получить из (1) и (2) через коэффициент  $q$  [10]:

$$q = P_x / P_y = \frac{(v_{kx} - v_{0x})}{(v_{ky} - v_{0y})}, \quad (3)$$

или

$$P_x = qP_y. \quad (4)$$

Тогда абсолютная величина импульса  $P$  выразится уравнением

$$P = \sqrt{P_y^2 + P_x^2} = \sqrt{P_y^2 + q^2 P_y^2} = P_y \sqrt{(1 + q^2)}. \quad (5)$$

Если до удара фреза вращалась относительно оси, проходящей через центр тяжести с угловой скоростью  $\omega$ ,  $\text{с}^{-1}$ , то поворот фрезы относительно оси, проходящей через точку  $O$ , осуществляется с некоторой угловой скоростью  $\omega_p$ ,  $\text{с}^{-1}$ . Согласно схеме, представленной на рис. 1, начальные и конечные скорости (до и после удара), входящие в (1) и (2):

$$v_{0x} = W, \quad (6)$$

так как до удара центр тяжести фрезы  $C$  двигался поступательно прямолинейно и равномерно со скоростью  $W$ ;

$$v_{0y} = 0, \quad (7)$$

поскольку до удара центр тяжести фрезы  $C$  не совершал движения в вертикальной плоскости;

$$v_{kx} = b\omega_p; \quad (8)$$

$$v_{ky} = a\omega_p, \quad (9)$$

где  $a$  и  $b$  – геометрические плечи (см. рис. 1), определяемые из простых геометрических соотношений и теоремы Пифагора:

$$b = R - h; \quad (10)$$

$$a = \sqrt{R^2 - b^2}, \quad (11)$$

где  $h$  – глубина фрезерования.

И до и после удара окружная скорость фрезы, в том числе в точке  $O$ , определялась угловой скоростью вращения фрезы  $\omega$  и ее радиусом  $R$ :

$$v = \omega R. \quad (12)$$

В момент удара фреза начинает проворачиваться относительно оси, проходящей через точку  $O$ , скорость которой равна нулю. Следовательно, именно эта точка является мгновенным центром скоростей [8], исходя из чего окружная скорость точки  $B$

$$v = 2\omega_p R, \quad (13)$$

откуда

$$\omega_p = \frac{v}{2R}. \quad (14)$$

С учетом (6–9) выражения (1) и (2) можно записать в следующем виде:

$$mb\omega_p - mW = m(b\omega_p - W) = P_x, \quad (15)$$

$$mv_{ky} = ma\omega_p = P_y. \quad (16)$$

Угол поворота фрезы, град., определяется из геометрического соотношения

$$\alpha = \arccos \frac{b}{R}. \quad (17)$$

Учитывая, что уже известны угловая скорость  $\omega_p$  и угол поворота фрезы во время удара, можно рассчитать время удара:

$$\Delta t = \frac{\pi\alpha}{180\omega_p}. \quad (18)$$

Усилие, действующее на фрезу во время удара об закрепленный пень, Н:

$$F = P / \Delta t. \quad (19)$$

Момент, действующий на фрезу во время удара об пень, Н·м:

$$M_{уд} = FR. \quad (20)$$

Относительно постоянный момент, действующий на фрезу в процессе фрезерования равнопрочного монолита (торфа, чернозема, глины и т.д.), Н·м:

$$M_{\phi} = N_{\phi} R / v, \quad (21)$$

где  $N_{\phi}$  – средняя мощность, Вт, необходимая для фрезерования равнопрочного монолита без включений.

Здесь следует сделать небольшое замечание. На самом деле вместо окружной скорости вращения фрезы в формуле (21) должна стоять геометрическая сумма окружной и поступательной скоростей фрезы, но поскольку окружная скорость намного больше поступательной ( $v \gg W$ ), то она и принимается в качестве единственно параметра.

Коэффициент, учитывающий увеличение нагрузочного момента при встрече рабочего органа с древесными включениями  $k$ :

$$k = M_{уд} / M_{\phi}. \quad (22)$$

Фреза на агрегате может быть установлена не только перпендикулярно направлению поступательного перемещения, но и под углом, и при этом осуществлять при этом косоугольное резание. Такой случай характерен для высокоскоростных профилировщиков, удаляющих возникшие бровки с краев поверхностей картовых полей. При расчете энергоемкости и мощности фрезерования таким рабочим органом необходимо знать активную ширину захвата фрезы.

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 2. Фреза длиной  $L$ , погружаясь в залежь, осуществляет фрезерование на глубину  $h$ . При этом  $R_n$  – радиус фрезы по концам режущих элементов (ножей). Объем фрезеруемого грунта определяется площадью сегмента  $ABD$  и активной шириной захвата фрезы.

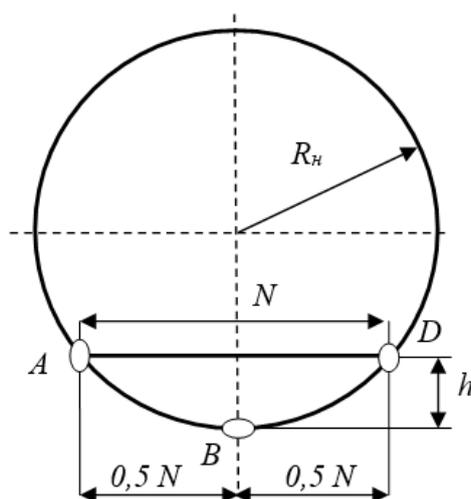


Рис. 2. Схема формирования сегмента фрезерования

Сегмент фрезерования образован, в свою очередь, высотой сегмента (глубиной фрезерования)  $h$ , длиной дуги  $ABD$  и хордой  $[AD] = N$ .

Из свойств кривых второго порядка [11]

$$h^2 - 2R_h h + \frac{N^2}{4} = 0, \quad (23)$$

откуда

$$N = \sqrt{8hR_h - 4h^2} = 2\sqrt{2hR_h - h^2}. \quad (24)$$

Если фреза установлена под углом  $\alpha$  к оси, перпендикулярной скорости поступательного перемещения агрегата  $W$ , то расчетная схема формирования активной ширины захвата рабочего органа  $L_{акт}$  будет выглядеть так, как это представлено на рис. 3.

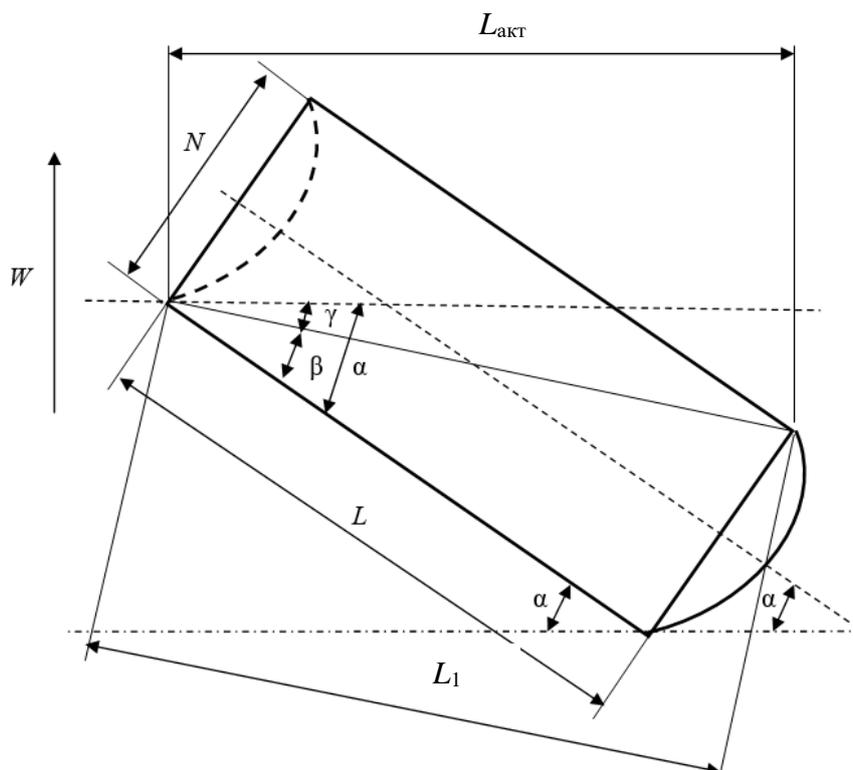


Рис. 3. Схема формирования активной ширины захвата фрезы

Наиболее простой способ определения активной ширины захвата фрезы (как это часто и делается) – воспользоваться формулой

$$L_{акт} = L \cos \alpha. \quad (25)$$

Однако даже беглый взгляд на рис. 3 покажет, что такой расчет носит весьма приблизительный характер. Очевидно, что

$$L_{акт} = L_1 \cos \gamma, \quad (26)$$

причем

$$L_1 = \frac{L}{\cos \beta}; \quad (27)$$

$$\gamma = \alpha - \beta; \quad (28)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{N}{L} = \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}; \quad (29)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}. \quad (30)$$

Из (28) и (30) можно определить  $\gamma$ :

$$\gamma = \alpha - \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}. \quad (31)$$

Подставив (30) в (27), получим

$$L_1 = \frac{L}{\operatorname{cosarctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}}. \quad (32)$$

И, наконец, подставив (31) и (32) в (26), окончательно имеем формулу для определения активной ширины захвата фрезы при косоугольном фрезеровании:

$$L_{\text{акт}} = \frac{L}{\operatorname{cosarctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}} \cos \left( \alpha - \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L} \right). \quad (33)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера приведем расчет динамических усилий, действующих на фрезу послойно-поверхностного фрезера типа МТФ-17 при встрече фрезы с закрепленным древесным включением. Исходные данные:

- масса фрезы  $m = 440$  кг;
- наружный радиус обечайки фрезы  $R = 0,17$  м;
- частота вращения фрезы относительно оси, проходящей через центр ее тяжести,  $n = 514$  об/мин;
- поступательная скорость движения фрезера  $W = 12$  км/ч = 3,33 м/с;
- глубина фрезерования  $h = 0,011$  м;
- средняя мощность, необходимая для фрезерования монолита без включений,  $N_{\phi} = 35$  кВт.

Необходимо определить коэффициент, учитывающий увеличение нагрузочного момента при встрече фрезы с древесным включением.

1. Начальная угловая скорость вращения фрезы,  $\text{с}^{-1}$ :

$$\omega = \pi n / 30 = 3,14 \cdot 514 / 30 = 53,8.$$

2. Начальные горизонтальная и вертикальная составляющие скорости центра тяжести фрезы до удара, м/с:

$$v_{0x} = W = 1,56;$$

$$v_{0y} = 0.$$

3. По формулам (10), (11) определим геометрические плечи контакта  $a$  и  $b$ , м:

$$b = R - h = 0,17 - 0,011 = 0,159;$$

$$a = \sqrt{R^2 - b^2} = \sqrt{0,17^2 - 0,159^2} = 0,06.$$

4. Из выражения (12) найдем окружную скорость вращения фрезы относительно оси, проходящей через центр ее тяжести, м/с:

$$v = \omega R = 53,8 \cdot 0,17 = 9,15.$$

5. При помощи формулы (12) рассчитаем угловую скорость вращения фрезы относительно оси, проходящей через жестко закрепленный пень, с<sup>-1</sup>:

$$\omega_p = \frac{v}{2R} = \frac{9,15}{2 \cdot 0,17} = 26,91.$$

6. Из выражения (17) найдем угол поворота фрезы вокруг точки  $O$  при контакте с жестко закрепленным древесным включением, град.:

$$\alpha = \arccos \frac{b}{R} = \arccos \frac{0,159}{0,17} = 20,72.$$

7. По формуле (18) определим время удара, с:

$$\Delta t = \frac{\pi \alpha}{180 \omega_p} = \frac{3,14 \cdot 20,72}{180 \cdot 26,91} = 0,013.$$

8. По формулам (8, 9) рассчитаем конечные горизонтальная и вертикальная составляющие скорости центра масс фрезы после удара, м/с:

$$v_{kx} = b \omega_p = 0,159 \cdot 26,91 = 4,28;$$

$$v_{ky} = a \omega_p = 0,06 \cdot 26,91 = 1,61.$$

9. Из выражения (16) найдем вертикальную составляющую импульса при ударе, Н·с:

$$P_y = m v_{ky} = 440 \cdot 1,61 = 708,4.$$

10. По формуле (3) определим коэффициент  $q$  соотношения проекций импульса:

$$q = \frac{P_x}{P_y} = \frac{(v_{kx} - v_{0x})}{(v_{ky} - v_{0y})} = \frac{(4,28 - 1,56)}{(1,61 - 0)} = 1,69.$$

6. По формуле (5) рассчитаем абсолютную величину импульса, кН·с:

$$P = P_y \sqrt{1 + q^2} = 708,4 \sqrt{1 + 1,69^2} = 1\,391,08 \text{ Н} \cdot \text{с} \approx 1,39.$$

7. По формуле (19) определим усилие, действующее на фрезу во время удара,  $F$ , кН:

$$F = P/\Delta t = 1,39/0,013 = 106,92.$$

8. Из выражения (20) найдем момент, действующий на фрезу во время удара, кН·м:

$$M_{уд} = FR = 106,92 \cdot 0,17 = 18,18.$$

9. Согласно формуле (21), относительно постоянный момент, действующий на фрезу в процессе фрезерования равнопрочного монолита (торфа, чернозема, глины и т.д.), кН·м:

$$M_{\phi} = N_{\phi}R/v = 35 \cdot 0,17/9,15 = 0,65.$$

15. По формуле (22) рассчитаем коэффициент, учитывающий увеличение нагрузочного момента при встрече рабочего органа с древесными включениями  $k$ :

$$k = M_{уд}/M_{\phi} = 18,18/0,65 = 27,97 \approx 28.$$

Данный пример ярко иллюстрирует, насколько возрастают нагрузки на приводы и рабочие органы машин при фрезеровании (резании, копании, строгании) неоднородной породы вследствие удара.

Определим активную ширину захвата фрезы при косоугольном фрезеровании торфяной залежи на глубину  $h = 0,02$  м при угле установки фрезы  $\alpha = 30^\circ$ . Длина фрезы  $L = 1,0$  м; радиус фрезы по концам ножей  $R_n = 0,15$  м.

Воспользуемся ранее полученной формулой (33):

$$L_{акт} = \frac{L}{\cos \arctg \frac{2\sqrt{2hR_n - h^2}}{L}} \cos \left( \alpha - \arctg \frac{2\sqrt{2hR_n - h^2}}{L} \right) =$$

$$= \frac{1,0}{\cos \arctg \frac{2\sqrt{2 \cdot 0,02 \cdot 0,15 - 0,02^2}}{1,0}} \cos \left( 30^\circ - \arctg \frac{2\sqrt{2 \cdot 0,02 \cdot 0,15 - 0,02^2}}{1,0} \right) = 0,941 \text{ м.}$$

В то же время, если бы активная ширина фрезы была определена по формуле (25), то результат был бы следующим:

$$L_{акт} = L \cos \alpha = 1,0 \cdot \cos 30^\circ = 0,866 \text{ м.}$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уточнены условия теоретического взаимодействия фрезы с закрепленным древесным включением.

2. Отработаны методики расчета коэффициента увеличения нагрузочного момента на фрезу при столкновении с древесным включением и определения активной ширины захвата фрезы при косоугольном фрезеровании.

3. Получена формула, позволяющая рассчитывать активную ширину захвата фрезы при косоугольном фрезеровании.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Яблонев А.Л. Теоретическое и экспериментальное обоснование параметров и режимов моделирования работы фрезеров послонно-поверхностного фрезерования торфяной залежи: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 1993. 150 с.
2. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Записки горного института*. 2020. Т. 241. С. 58–67.
3. 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.
4. Горлов И.В., Рахутин М.Г. Влияние пнистости залежи на безотказность торфяных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2017. № 12. С. 139–145.
5. Баловнев В.И. Оценка инновационных предложений в дорожной и строительной технике. М.: МАДИ, 2008. 100 с.
6. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985. 211 с.
7. Самсонов Л.Н., Синицын В.Ф. Торфяные машины и комплексы: учебник для вузов: в 3 ч. Тверь: ТГТУ, 2001. Ч. 3. 140 с.
8. Яблонев А.Л. Пневматический колесный ход и особенности его взаимодействия с торфяной залежью: монография. Тверь: ТвГТУ, 2011. 168 с.
9. Никитин Е.М. Теоретическая механика для техникумов. М.: Наука, 1988. 336 с.
10. Черногоров Е.П. Теоретическая механика. Элементы теории удара. Челябинск: ЮУрГУ, 2013. 12 с.
11. Акопян А.В., Заславский А.А. Геометрические свойства кривых второго порядка. М.: МЦНМО, 2007. 136 с.

**Для цитирования:** 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.

## **CALCULATION OF THE MOMENT OF RESISTANCE TO MILLING A PEAT LAYOUT WHEN THE MILLER HITS A STUMP AND DETERMINATION OF THE ACTIVE WIDTH OF THE WORKING BODY**

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

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

One of the main operations of the milling method of peat extraction is milling. Drying depends on the quality of the milling, and, accordingly, the entire subsequent production process. The presence of wood inclusions in the peat deposit greatly complicates the work. The sharply increased moment of loading, which occurs when the cutter hits the stump, is able to deactivate both the transmission elements and the drive of the milling unit. Therefore, at the design stage, it is necessary to take into account the dynamic loads arising from the meeting of the cutter with wood inclusions. Attempts to describe a similar fact were previously undertaken by various

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 2 (10), 2021*

authors, but due to mathematical and methodological errors, they were not crowned with success. In this article, an attempt was made to «work on errors», which allowed, taking into account all the previous errors and inaccuracies, to achieve the desired result.

*Keywords:* milling, peat, timber content, wood inclusion, cutter, cutter knife, impulse preservation law, moment of resistance to milling, active width of the cutter.

## REFERENCES

1. Yablonev A.L. Theoretical and experimental substantiation of the parameters and modes of modeling the operation of milling cutters for layer-by-layer surface milling of peat deposits. Cand. dis. (engineering). Tver, 1993. 150 p. (In Russian).
2. Fomin K.V. Method for assessing the spectral density of the moment of resistance on the working body of a peat milling unit. *Zapiski gornogo institute*. 2020. V. 241, pp. 58–67. (In Russian).
3. Fomin K.V., Rakhutin M.G. Modeling the damaging effects on the cutting elements of the working body of the milling unit when interacting with peat. *Gorniy informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhn. zhurnal)*. 2019. No S39, pp. 36–46. (In Russian).
4. Gorlov I.V., Rakhutin M.G. Influence of stumpiness of deposits on the reliability of peat machines. *Gorniy informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhn. zhurnal)*. 2017. No 12, pp. 139–145. (In Russian).
5. Balovnev V.I. Otsenka innovatsionnykh predlozheniy v dorozhnoy i stroitelnoy tekhnike [Evaluation of innovative proposals in road and construction equipment]. Moscow: MADI, 2008. 100 p.
6. Samsonov L.N. Frezerovaniye torfianoy zalezhi [Milling of peat deposits]. Moscow: Nedra, 1985. 211 p.
7. Samsonov L.N., Sinitsin V.F. Torfyanye mashiny i komplekсы. V 3 ch.: uchebnik dlia vuzov [Peat machines and complexes. Part 3: textbook for universities]. Tver: TGTU, 2001. Ch. 3. 140 p.
8. Yablonev A.L. Pnevmaticheskiy kolesniy hod i osobennosti yego vzaimodeistviya s torfianoy zalezhyu: monografiya [Pneumatic wheel running and peculiarities of its interaction with peat deposits: monograph]. Tver: TvGTU, 2011. 168 p.
9. Nikitin Ye.M. Teoreticheskaya mekhanika dlya tehnikumov [Theoretical mechanics for technical schools]. Moscow: Nauka, 1988. 336 p.
10. Chernogorov Ye.P. Teoreticheskaya mekhanika. Elementi teorii udara [Theoretical mechanics. Elements of impact theory]. Cheliabinsk: YuUrGU, 2013. 12 p.
11. Akopian A.V., Zaslavskiy A.A. Geometricheskiye svoystva krivykh vtorogo poriadka [Geometric properties of curves of the second order]. Moscow: MTsNMO, 2007. 136 p.

Поступила в редакцию/received: 12.01.2021; после рецензирования/revised: 25.03.2021;  
принята/accepted: 31.03.2021