

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПЕРЕРАБОТКИ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ В ВАЛКОВО-ДИСКОВОМ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ

Нагорнов Д.О. ¹, Кремчеев Э.А. ², Казаченко Г.В. ³

¹ ФГБУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: nagornov_d_spmi@mail.ru

² ФГБУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: kremcheev@mail.ru

³ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: kazachenko@bntu.by

В статье представлен анализ факторов, влияющих на качество продукции, производимой на основе торфяного сырья. Дан обзор механизмов, используемых в настоящее время при производстве торфяной продукции. Представлена методика оценки степени переработки торфа при его прохождении через перерабатывающий валково-дисковый механизм, с учётом допущения условия неразрывности и неизменности объема проходящего сырья.

При производстве качественной торфяной продукции из экскавируемого торфяного сырья необходимо учитывать широкий перечень факторов, которые условно можно объединить в следующие группы – свойства экскавированного сырья, метеорологические факторы, параметры машин и механизмов, используемых при добыче и переработке сырья [1-3]. В первой группе в качестве определяющего фактора можно выделить степень переработки торфяного сырья, существенно влияющего на технологические процессы сушки, энергетические затраты по переработке сырья и в конечном итоге на качество производимой продукции.

В практике полевого производства торфяной продукции в виде различных по форме и размерам кусков наибольшее применение получили механизмы на основе шнековых экструдеров, что обусловлено их высокой перерабатывающей способностью, простотой конструкции и свободой выбора формующих мундштуков. Вместе с тем во многих случаях шнековые пресс-формователи неэффективны по энергетическим показателям, особенно по удельным затратам энергии на тонну производимой продукции. Поэтому не прекращаются попытки создания других, более эффективных и производительных перерабатывающе-формующих устройств, обеспечивающих получение полевой продукции сырья, заданного гранулометрического состава [4, 5].

Одно из перспективных направлений создания таких устройств – использование валково-дисковых перетирателей, принцип действия которых позволяет объединить операции сепарации торфяного сырья и его первичной переработки для производства различных продуктов на основе торфа [6, 7]. Для определения степени переработки торфа-сырца в валково-дисковом устройстве определим его относительные деформации при прохождении в пространстве между двумя соседними валками с дисками, соединенными с валками через

ступицы. Переработка в таком механизме осуществляется за счет деформаций сдвига, которые возникают в результате скольжения слоев торфа относительно друг друга, а также за счет деформаций раздавливания при сужении в пространстве между двумя соседними валками. При определении относительных деформаций, возникающих при этом, будем считать, что условия неразрывности и неизменности объема соблюдаются.

Деформации сдвига за счет разности скоростей слоев торфа в плоскости, перпендикулярной осям валков носят сложный характер вследствие несовпадения направлений движения частиц торфа, соприкасающихся с боковыми поверхностями дисков со скоростями точек этих поверхностей. Разобьем область, в которой торф подвергается переработке на несколько частей таким образом, чтобы вычислить в них средние значения степени переработки [8]. Рассмотрим сначала область (рис. 1) между боковыми поверхностями двух дисков, принадлежащих соседним валам.

При одинаковых скоростях вращения валов и геометрических размеров дисков поле скоростей точек боковых поверхностей дисков симметрично относительно геометрических осей фигуры пересечения дисков. Эта фигура – два сложенных хордами, равных между собой сегмента с центральными углами 2α . Определим объем материала, проходящего через эту фигуру

$$Q_d = S_d \cdot v, \quad (1)$$

где S_d – площадь поперечного сечения потока материала, проходящего между дисками; v – скорость материала в этом сечении, м/с.

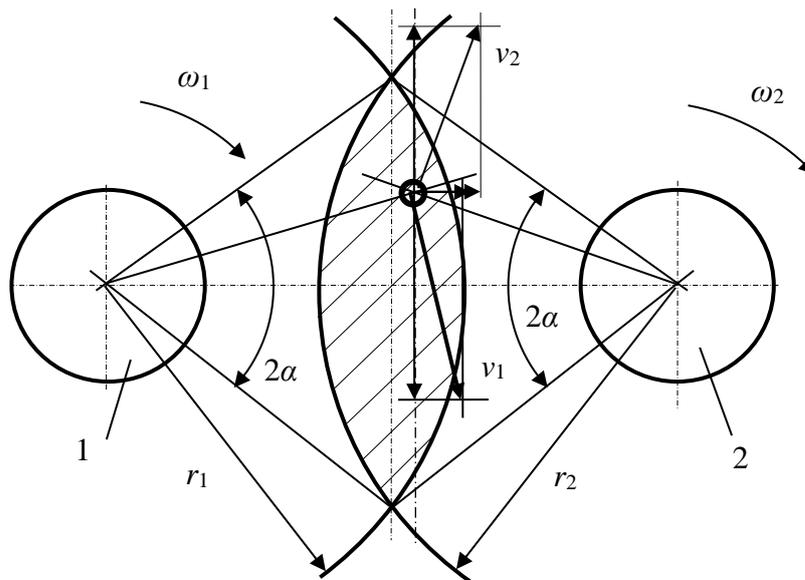


Рисунок 1. Определение пространства между дисками в котором происходит переработка.

Площадь S_∂ поперечного сечения

$$S_\partial = b(h_\partial - \bar{b}_\partial), \quad (2)$$

где b – ширина проходного сечения, м; h_∂ – шаг установки дисков на валу, м; \bar{b}_∂ – толщина диска, м; h_∂ – диаметр вала, м.

Ширина сечения потока материала между дисками изменяется от нуля до максимального значения b_{\max} и обратно до нуля. Текущее значение ширины сечения (рис. 2.)

$$b = (2 \cdot r_\partial - h_\partial) - 2 \int_0^\alpha db, \quad (3)$$

где db – дифференциал ширины сечения, выраженный через угол α , измеряемый от плоскости, содержащей оси валов,

$$db = r \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha. \quad (4)$$

Интегрируя и определяя постоянную интегрирования при $\alpha = 0$, имеем

$$b = (2 \cdot r_\partial - h_\partial) - 2 \cdot r_\partial (1 - \cos \alpha), \text{ или } b = 2 \cdot r_\partial \cdot \cos \alpha - h_\partial. \quad (5)$$

Тогда

$$S_\partial = (h_\partial - \bar{b}_\partial) \cdot (2 \cdot r_\partial \cdot \cos \alpha - h_\partial), \quad (6)$$

$$Q_\partial = (h_\partial - \bar{b}_\partial) \cdot (2 \cdot r_\partial \cdot \cos \alpha - h_\partial) \cdot v. \quad (7)$$

При определении скорости материала в соответствующих сечениях считаем, что она возрастает от начального значения в наибольшем сечении до сечения наименьшей ширины в соответствии с условием $s \cdot v = \text{const}$.

Начальная площадь сечения $s_0 = a \cdot b$. Далее она уменьшается по закону

$$\begin{aligned} s &= s_0 - 2 \cdot z_\partial \cdot z_\partial \cdot \bar{b}_\partial \cdot r_\partial \cdot \cos \alpha \quad \text{при } r_\partial \cdot \sin \alpha \geq r_{cm}; \\ s &= s_0 - 2 \cdot z_\partial \cdot z_\partial \cdot \bar{b}_\partial \cdot r_\partial \cdot \cos \alpha - 2 \cdot z_\partial \cdot z_\partial \cdot \bar{b}_{cm} \cdot r_{cm} \cdot \cos \alpha \quad \text{при } r_{cm} \cdot \sin \alpha \geq r_\partial; \\ s &= s_0 - 2 \cdot z_\partial \cdot z_\partial \cdot \bar{b}_\partial \cdot r_\partial \cdot \cos \alpha - 2 \cdot z_\partial \cdot z_\partial \cdot \bar{b}_{cm} \cdot r_{cm} \cdot \cos \alpha - 2 \cdot z_\partial \cdot b \cdot r_\partial \cdot \cos \alpha \\ &\quad \text{при } r_\partial \cdot \sin \alpha \geq 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\bar{b}_\partial, \bar{b}_{cm}$ – толщина диска и ступицы, м; $r_\partial, r_{cm}, r_\partial$ – диаметры диска, ступицы и вала, м; z_∂ , – число валов; z_∂ – число дисков на валу.

При постоянной производительности Q средняя скорость потока материала $v = Q/S$. Через величину этой скорости определяем время нахождения перерабатываемого материала в пространстве между боковыми поверхностями дисков

$$t = l/v, \quad (9)$$

где l – длина пути материала при прохождении между боковыми поверхностями дисков. Это расстояние зависит от положения части рассматриваемого потока материала относительно валов

$$l = 2 \cdot r_{\partial} \cdot \sin \alpha_{\kappa}, \quad (10)$$

где $0 \leq \alpha \leq \alpha_{\kappa}$ - половина текущего значения угла контакта дисков.

Степень переработки также зависит от этого расстояния. Определяя элементарную степень переработки через скорости прилегающих к дискам слоев торфа

$$d\lambda_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_2 - v_1}{h_{\partial} - \bar{b}_{\partial}} \cdot dt, \quad (11)$$

где v_2, v_1 – скорости торфа в местах соприкосновения его с боковыми поверхностями дисков.

$$d\lambda_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_2 - v_1}{h_{\partial} - \bar{b}_{\partial}} \cdot \frac{dl}{v} = \frac{v_2 - v_1}{h_{\partial} - \bar{b}_{\partial}} \cdot \frac{r_{\partial} \cdot \cos \alpha}{v} \cdot d\alpha. \quad (12)$$

Таким образом

$$\lambda_1 = \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{v_2 - v_1}{h_{\partial} - \bar{b}_{\partial}} \cdot \frac{r_{\partial} \cdot \cos \alpha}{v} \cdot d\alpha = \frac{r_{\partial}}{2 \cdot (h_{\partial} - \bar{b}_{\partial}) \cdot v} \int_{-\alpha}^{\alpha} (v_2 - v_1) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha. \quad (13)$$

Производительность через часть сечения, в которой достигается степень переработки λ_1

$$dQ_1 = v \cdot dS, \quad (14)$$

где $dS_1 = (h_{\partial} - \bar{b}_{\partial}) \cdot r_{\partial} \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha$.

Тогда

$$Q_1 = v \cdot r_{\partial} \cdot \cos \alpha. \quad (15)$$

Определим теперь среднюю степень переработки материала в пространстве между дисками

$$\lambda_{1c} = \frac{\int \lambda_1 dQ_1}{Q_{10}} = \frac{2 \cdot r_{\partial}^2}{Q(h_{\partial} - \bar{b}_{\partial})} \cdot \int_0^{\alpha_{\kappa}} (v_2 - v_1) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \cdot \int_0^{\alpha_{\kappa}} \cos \alpha \cdot d\alpha. \quad (16)$$

Если определить среднее значение разности $v_2 - v_1$ скоростей торфа около боковых поверхностей дисков, то имеем окончательно

$$\lambda_{1c} = \frac{2 \cdot r_{\partial}^2 \cdot (v_2 - v_1)}{Q \cdot (h_{\partial} - \bar{b}_{\partial})} \left(\int_0^{\alpha_{\kappa}} \cos \alpha \cdot d\alpha \right)^2 = \frac{2 \cdot r_{\partial}^2 \cdot (v_2 - v_1)}{Q \cdot (h_{\partial} - \bar{b}_{\partial})} \cdot \sin^2 \alpha_{\kappa}, \quad (17)$$

где

$$\sin \alpha_{\kappa} = \frac{\sqrt{r_{\partial}^2 - \frac{1}{4} h_e^2}}{r_{\partial}}. \quad (18)$$

Определяя среднее значение разности $v_2 - v_1$ скоростей торфа около боковых поверхностей дисков примем во внимание то, что по мере опускания поток материала сужается. Вследствие этого появляется дополнительная переработка за счет поперечных смещений. Величину интенсивности деформаций за счет таких смещений определим отдельно.

Следуя [9] запишем

$$\dot{v}_2 = v_{2\partial} - v_{ck}; \dot{v}_1 = v_{1\partial} + v_{ck}, \quad (19)$$

где \dot{v}_2 - скорости торфа в местах соприкосновения его с боковыми поверхностями второго диска, м/с; $v_{2\partial}$ - скорость точки диска, контактирующей с торфом, имеющим скорость \dot{v}_2 ; \dot{v}_1 , $v_{1\partial}$ - то же самое для первого диска; v_{ck} - скорость скольжения торфа относительно боковых поверхностей дисков

$$v_{2\partial} = \omega \cdot r_2 \cdot \cos \alpha_2; \quad v_{1\partial} = \omega \cdot r_1 \cdot \cos \alpha_1; \quad (20)$$

$$\dot{v}_2 = \omega \cdot r_2 \cdot \cos \alpha_2 - v_{ck}; \quad \dot{v}_1 = \omega \cdot r_1 \cdot \cos \alpha_1 + v_{ck},$$

где r_1 , r_2 - текущие значения радиусов контакта.

Средние значения скоростей \dot{v}_2 и \dot{v}_1 определим путем их осреднения по общей области контакта боковых поверхностей с торфом

$$\dot{v}_2 = \frac{\int_{r_1' - \alpha_k}^{r_2'} \int_{\alpha_k}^{\alpha_k} \omega \cdot r_2^2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot d\alpha \cdot d\omega - \int_{r_1' - \alpha_k}^{r_2'} \int_{\alpha_k}^{\alpha_k} v_{ck} \cdot r_2 \cdot d\alpha \cdot dr}{r_\partial^2 (2 \cdot \alpha_k - \sin 2\alpha_k)}; \quad (21)$$

$$\dot{v}_1 = \frac{\int_{r_1' - \alpha_k}^{r_2'} \int_{\alpha_k}^{\alpha_k} \omega \cdot r_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot d\alpha \cdot d\omega - \int_{r_1' - \alpha_k}^{r_2'} \int_{\alpha_k}^{\alpha_k} v_{ck} \cdot r_1 \cdot d\alpha \cdot dr}{r_\partial^2 (2 \cdot \alpha_k - \sin 2\alpha_k)}, \quad (22)$$

где r_1' и r_2' - границы общей области контакта.

Определив пределы интегрирования $r_2' = r_\partial$, $r_1' = r_\partial - h_g / 2$ и произведя интегрирование с учетом того, что $v_{ck} = const$, имеем

$$\dot{v}_2 = \frac{\omega \cdot \left(r_\partial^3 - \frac{h_g^3}{8} \right) \cdot 2 \cdot \sin \alpha_k}{3 \cdot r_\partial^2 \cdot (2\alpha_k - \sin 2\alpha_k)} - v_{ck}. \quad (23)$$

Для вычисления \dot{v}_2 и \dot{v}_1 можно пользоваться формулами

$$v_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega \cdot r_\partial \cdot \sin \alpha_\kappa}{(2\alpha_\kappa - \sin 2\alpha_\kappa)} - v_{\text{СК}}, \quad (24)$$

$$v_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega \cdot r_\partial \cdot \sin \alpha_\kappa}{(2\alpha_\kappa - \sin 2\alpha_\kappa)} + v_{\text{СК}}. \quad (25)$$

Тогда

$$v_2 - v_1 = \frac{4}{3} \cdot \omega \cdot r_\partial \cdot \frac{\sin \alpha_\kappa}{2 \cdot \alpha_\kappa - \sin 2\alpha_\kappa} - 2 \cdot v_{\text{СК}}, \quad (26)$$

$$\lambda_{1c} = \frac{8}{3} \cdot \omega \cdot r_\partial^3 \cdot \frac{\sin^3 \alpha_\kappa}{Q \cdot (h_\partial - \bar{b}_\partial) \cdot (2 \cdot \alpha_\kappa - \sin 2\alpha_\kappa)} - \frac{4}{3} \cdot \frac{v_{\text{СК}} \cdot r_\partial^2 \cdot \sin^2 \alpha_\kappa}{Q \cdot (h_\partial - \bar{b}_\partial)} \quad (27)$$

Сдвиговые деформации за счет изменения сечения потока материала, проходящего через валки, определим из условия его неразрывности и неизменности размера поперечного сечения.

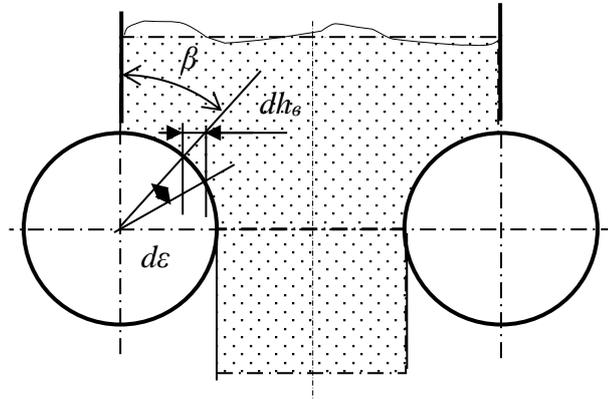


Рисунок 2. Расчетная схема к определению относительных деформаций торфа при прохождении через роторно-дисктовую поверхность [10].

$$dh_\epsilon = r_\epsilon \cdot d\beta \cdot \cos \beta; \quad (28)$$

$$d\epsilon_1 = r_\epsilon \cdot d\beta \cdot \cos \beta.$$

Эти условия дают следующие соотношения между относительными деформациями вдоль трех взаимно перпендикулярных осей

$$\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} = 0, \quad (29)$$

где $\epsilon_{11} = \frac{d_\epsilon}{h_\epsilon}$, а $\epsilon_{22} = 0$.

Откуда получаем $\epsilon_{33} = -\epsilon_{11}$ и

$$d\lambda_2 = \sqrt{2 \cdot d\epsilon_{11}^2} = \sqrt{2} \cdot \epsilon_{11} \quad \text{и} \quad \lambda_2 = \frac{v_2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{d_\epsilon}{h_\epsilon}. \quad (30)$$

Третья составляющая тензора интенсивности деформаций – сдвиговые деформации вдоль цилиндрических поверхностей валов, ступиц и дисков. Эти деформации распространяются в небольшой части потока материала около указанных поверхностей. Для вычисления интенсивности деформаций при этом воспользуемся формулой

$$d\varepsilon_{31} = \frac{v - v_{CK}}{\delta} \cdot dt, \quad (31)$$

где v – скорость материала, м/с; δ – толщина пристенной части потока, м.

Как и прежде $dt = dl/v$, тогда

$$d\varepsilon_{31} = \frac{v - v_{CK}}{\delta \cdot v} \cdot dl. \quad (32)$$

Так как $dl = r \cdot d\alpha$, где α – угол контакта роторов с материалом, рад, то

$$d\varepsilon_{31i} = \frac{v - v_{CK}}{\delta \cdot v} \cdot r_i \cdot d\alpha_i, \quad (33)$$

где $i = 1, 2, 3$ – номер рассматриваемого элемента с торфом (1 – диск; 2 – ступица; 3 – вал); α_{ky} – угол контакта цилиндрической поверхности соответствующего элемента с торфом, рад.

Если рассматривать пространство между двумя валами, то следует считать все углы контакта цилиндрических поверхностей соответствующих элементов равными между собой. Тогда

$$\varepsilon_{31d} = \frac{v - v_{CK}}{\delta \cdot v} \cdot r_d \cdot \alpha_{ky}, \quad \varepsilon_{31c} = \frac{v - v_{CK}}{\delta \cdot v} \cdot r_c \cdot \alpha_{ky}, \quad \varepsilon_{31e} = \frac{v - v_{CK}}{\delta \cdot v} \cdot r_e \cdot \alpha_{ky}. \quad (34)$$

Общая относительная деформация в пристенном слое

$$\varepsilon_{31} = \varepsilon_{31d} + \varepsilon_{31c} + \varepsilon_{31e} = \frac{v - v_{CK}}{\delta \cdot v} \cdot \alpha_{ky} \cdot (r_d + r_c + r_e). \quad (35)$$

Степень переработки в этом слое

$$\lambda_3 = \sqrt{2} \cdot \varepsilon_{31} = \frac{v - v_{CK}}{\delta \cdot v} \cdot \alpha_{ky} \cdot \sqrt{2} \cdot (r_d + r_c + r_e). \quad (36)$$

Выразим производительность через этот слой

$$\begin{aligned} Q_{\delta} &= \frac{v + v_{CK}}{2} \cdot [z_d \cdot \delta_d \cdot z_e \cdot \delta + z_d \cdot \delta_c \cdot z_e \cdot \delta + z_e \cdot \delta \cdot (b - z_d \cdot \delta_d - z_d \cdot \delta_c)] = \\ &= \frac{v + v_{CK}}{2} \cdot z_e \cdot \delta \cdot [z_d \cdot \delta_d + z_d \cdot \delta_d + z_d \cdot \delta_c + (b - z_d \cdot \delta_d - z_e \cdot \delta_c)] \end{aligned} \quad (37)$$

Теперь можно определить среднее значение степени переработки торфа при его прохождении через перерабатывающий валково-дисковый механизм

$$\lambda_c = \frac{\lambda_1 \cdot Q_1 + \lambda_2 \cdot Q_2 + \lambda_3 \cdot Q_3}{Q}. \quad (38)$$

Выполненный в работе теоретический анализ параметров валково-дискового перерабатывающего устройства произведен с допущением постоянства характеристик перерабатываемого торфяного сырья, неразрывности потока материала через перерабатывающую поверхность и равенства угла контакта на всех поверхностях [11].

Представленная методика может быть применима для расчёта степени переработки торфяного сырья на устройствах, оборудованных валково-дисковой просеивающей поверхностью, что позволит в дальнейшем определить затраты энергии на производство продукции на основе торфа с помощью подобных устройств.

Список литературы

1. Нагорнов, Д.О. Развитие технологии добычи топливного торфа / Д.О. Нагорнов, Э.А. Кремчеев // «Наука - образованию, производству, экономике» Материалы девятой международной научно-технической конференции в 4 томах, том 1. – Минск, 2011. – С. 366.
2. Селеннов, В.Г., Михайлов, А.В. Торф в малой энергетике // Академия энергетики. – 2009. – № 1 (27). – С. 48–56.
3. Нагорнов, Д.О. Сравнение модульных механизированных комплексов для добычи и первичной переработки торфа / Д.О. Нагорнов, Э.А. Кремчеев, А.В. Михайлов, А.В. Большунов // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» - 6-я Международная Конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы конференции: ТулГУ. – Тула, 2010. – Т. 1. – С. 131–138.
4. Петров, Ю.О. Интенсификация процесса подготовки торфяного сырья при производстве субстратных торфоблоков (диссертация на соискание ученой степени к.т.н.). – Л., 1987. – 192 с.
5. Павлов, Ю.Н. Совершенствование процесса разделения торфяного сырья на валковых сепараторах подготовительных отделений перерабатывающих предприятий / дис. к.т.н. – 2002. – С. 13–15.
6. Кремчеев, Э.А. Организация транспорта торфа на торфопредприятии «Саккала» с круглогодовой технологией добычи/ Э.А. Кремчеев, Д.О. Нагорнов // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» - 6-я Международная Конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы конференции: ТулГУ. – Тула, 2010. – Т. 1. – С. 142–150.
7. Пономорёв, И.В. Дробление и грохочение углей. – М.: Недра, 1970. – 367 с.
8. Рего, К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений. // Справочник. К., Техника. – 1987. – 128 с.
9. Опейко, Ф.А. Торфяные машины. – Минск, Выш. школа, 1968. – 408 с.
10. Нагорнов, Д.О. Степень переработки торфа между дисками валково-дискового перетирателя. / Д.О. Нагорнов, Г.В. Казаченко // Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых, сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 80-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы Беларуси, доктора технических наук, профессора Кислова Николая Владимировича 17-20 апреля 2012. – Минск, 2012. – С. 266–271.
11. Нагорнов, Д.О. Конструктивные особенности сменного рабочего оборудования торфяной выемочно-погрузочной машины / Д.О. Нагорнов, Э.А. Кремчеев // Записки Горного института. РИЦ СПГУ. – СПб., 2012. – Т. 195. – С. 271–275.

ASSESSMENT OF THE DEGREE OF PROCESSING OF PEAT RAW MATERIALS IN ROLLER-DISK MANUFACTURING EQUIPMENT

Naгорнов D.O., Kremcheev E.A., Kazachenko G.V.

The article presents the analysis of factors affecting the quality of products produced on the basis of peat raw materials. An overview of the mechanisms currently used in the production of peat products is given. The method of estimation of the degree of peat processing during its passage through the processing roller-disk mechanism, taking into account the assumption of continuity and immutability of the volume of passing raw materials.