УДК 662. 641. 047: 552. 577: 542.67

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ПРИ ПОЛЕВОМ ОБОГАЩЕНИИ ТОРФА

Кремчеев Э.А.[1], Михайлов А.В.[1], Афанасьев А.Е.[2]

[1] *Горный университет (199106, Санкт-Петербург, В.О. 21-линия, дом 2), e-mail: kremcheev@mail.ru, e-mail: epc68@mail.ru*
[2] *Тверской государственный технический университет (170026, Тверь, Комсомольский пр., 5)*

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на установление рациональной толщины расстила торфа нарушенной структуры в технологических схемах полевого производства торфяной продукции и торфяного сырья для последующей заводской переработки. Установлена толщина слоя с максимумом интенсивности испарения, и с учетом ранее проведенных исследований по гравитационному обезвоживанию торфяного сырья нарушенной структуры установлен диапазон значений рациональной толщины сушимого расстила. Рациональное значение толщины слоя торфяного сырья при гравитационном обезвоживании и радиационно-конвективной сушке в зависимости от изменяющихся внешних условий находится в диапазоне от 0,100 до 0,175 м. Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при создании, рационализации и интенсификации прогрессивных технологических процессов при добыче торфа.

Ключевые слова: добыча, торф, полевое обогащение, испарение.

ON EVALUATION OF THE INTENSITY OF MOISTURE REMOVAL IN PEAT PRODUCTION

Kremcheev E.A.[1], Mikhaylov A.V. [1], Afanasev A.E. [2]

[1]*Mining University, (2, 21-line V.O., 199106 Saint-Petersburg, Russia), e-mail: kremcheev@mail.ru, e-mail: epc68@mail.ru*
[2] *State Technical University, (5, Komsomolsky pr., 170026 Tver, Russia)*

The paper presents the results of theoretical and experimental researches that aimed at establishing a rational thickness of the peat layer in production technologies of peat products and raw materials for peat processing factory. Established thickness with a maximum evaporation rate and results of previous researches with gravitational dewatering of peat raw material allowed to establish the rational thickness of the dried layer of peat. Rational value of thickness layer of peat raw materials at a gravitational dewatering and radiation and convective drying depending on changing external conditions is in range from 0,100 to 0,175 m. The received results and recommendations can be used at creation, rationalization and an intensification of progressive technological processes at peat production.

Keywords: mining operation, peat, field enrichment, evaporation.

Введение

Вопросам интенсификации процессов добычи торфа посвящена масса научных работ. В последнее время следует отметить рост активности исследователей, работающих в области торфяного производства, что, в первую очередь, объясняется возросшей заинтересованностью бизнеса в создании производств разнородной, востребованной на рынке продукции на основе торфа. Одной из основных особенностей большинства технологических решений добычи торфа является возможность получения кондиционного сырья исключительно в период непродолжительного добычного сезона. Именно данное обстоятельство направляет исследователей по трем основным направлениям: создание технологий, обеспечивающих увеличение сборов кондиционного сырья и торфяной продукции в рамках добычного сезона; расширение сезона добычи кондиционного сырья;

заводская переработка сырого торфа с получением кондиционного торфяного сырья и торфяной продукции. По какому бы направлению не двигался исследователь, главным вопросом, от решения которого зависит эффективность создаваемой технологии, является вопрос удаления влаги из материала.

Данная работа основана на анализе процессов тепломассопереноса в торфяных системах, и полученные результаты позволяют сделать определенные выводы о потенциальных возможностях интенсификации полевой сушки торфяного сырья.

Аналитическая база

При изучении процессов гравитационного обезвоживания торфяного сырья в навале [9,10,11] установлено, что вклад потока влаги, идущего на испарение в процессе влагопереноса, начинает играть существенную роль с уменьшением гравитационной составляющей, когда d в результате действия капиллярно-поверхностных сил возникает давление P_k, в пределе приближающееся к гравитационному P_g. В процессе обезвоживания, по мере выравнивания капиллярных и гравитационных сил в торфяной системе нарушенной структуры, высота навала торфяного сырья уменьшается и достигает критической толщины $H_{кр}$. В этом случае интенсивность гравитационного обезвоживания снижается до нуля. В дальнейшем процесс снижения влагосодержания торфяного сырья в навале происходит за счет испарения, т.е. роль испарения влаги $i_и$ в общем балансе влагопереноса возрастает. При критической высоте расстила торфяного сырья (критической толщине, зависящей в первую очередь от его исходной влажности) общий поток влаги i будет определяться интенсивностью сушки $i_и$ торфа в расстиле или на откосах промежуточного штабеля:

$$i = i_и \text{ при } i_g = 0. \quad (1)$$

Таким образом, при $h_i = H_{кр}$ процесс обезвоживания определяется суммой потоков влаги,

$$i = i_g + i_и. \quad (2)$$

Если в качестве одной из технологических характеристик процесса сушки (подсушки) торфа принять момент времени достижения равновесного состояния (время τ_P), при котором на долю испарения приходится до 50 % потерянной торфом влаги, то с ростом высоты навала торфа продолжительность данного периода будет увеличиваться. Например, в ходе экспериментальных исследований установлено, что для шейхцериево-сфагнового торфа степенью разложения $R_Т$=22-25 % при $t_c = 21{,}8$ ^{0}С, при изменении начальной высоты навала торфа в диапазоне от 100 до 400 мм, время τ_P изменялось от 18 до 60 часов при

конвективном теплоподводе (К-режим) и от 8 до 43 часов при радиационно-конвективном тепловодводе (РК-режим) согласно уравнению:

$$\tau_p = k_h \cdot h_н , \tag{3}$$

где $k_h = d\tau_p / dh_н$ – угловой коэффициент зависимости $\tau_p = f(h_н)$; $h_н$ – начальная высота навала торфяного сырья.

Уравнение (3) дает результирующее значение, отражающее взаимодействие сил P_k и P_g, зависящее от углового коэффициента k_h и эффективного коэффициента влагопереноса $K^{/}_{эф}$, т.е.

$$\tau_p = -K^{/}_{эф} k_h \frac{P_k - P_g}{i_g} . \tag{4}$$

Экспериментальные исследования, проведенные с шейхцериево-сфагновым торфом (обладающим минимальной влагопроводностью) показали, что при РК-режиме теплоподвода значения $k_{h2} = 0{,}1 \cdot 10^3$ ч/м, а при К-режиме, $k_{h1} = 0{,}15 \cdot 10^3$ ч/м [9].

Следовательно, во втором случае, очевидно, возрастание роли интенсификации теплоподвода в процессах обезвоживания торфяного сырья в навале.

В полевых условиях интенсификация процессов сушки возможна как за счет максимального использования радиационного баланса B сушимого слоя [1,5,7,9], вследствие изменения его структуры, влагосодержания, размеров частиц, так и вследствие регулирования высоты навала, обеспечивающего варьирование критической толщины $H_{кр}$ и послойного влагосодержания, которое тем меньше, чем больше начальная высота навала $h_н$ [9,11]. Это положение следует из анализа не только экспериментальных данных [1, 2, 9, 13], но и выполненных ранее ряда теоретических исследований [3,7,10,12,13].

Следовательно, при текущей высоте расстила $h_i < H_{кр}$ на величину интенсивности испарения $i_и$ могут влиять тепловой и водный балансы навала торфяного сырья, сушимого в полевых условиях. Из анализа уравнения теплового баланса следует, что затраты тепла iL на испарение влаги целесообразно определять, используя выражение:

$$i_и L = B - P - F , \tag{5}$$

которое после подстановки соответствующих значений радиационного баланса B, теплового потока

$$P = P_{гл} + P_{ак} , \tag{6}$$

турбулентного оттока F, преобразуется в формулу В.В. Романова [7] для оценки интенсивности испарения:

$$i_u = \alpha_R (B - P), \tag{7}$$

где α_R – коэффициент, зависящий от внешних условий сушки и характеризующий при P→0 удельное количество испарившейся влаги; $P_{ак}$ – затраты тепла на теплоаккумуляцию слоем торфа; $P_{гл}$ – глубинный отток тепловой энергии в нижележащие слои (подстилающую торфяную залежь, минеральный подстил и пр.).

Раннее [9] было получено выражение для оценки интенсивности испарения в виде

$$i_u = \frac{B + \alpha_q (t_c - t_n)}{R_n}. \tag{8}$$

В формуле (8) в отличие от формулы (7) тепловой поток

$$q_k = \frac{\alpha_q (t_c - t_n)}{L} \tag{9}$$

только частично учитывается коэффициентом α_R, хотя на его долю приходится около половины суммарной радиации [1].

В приведенных выражениях L – удельная теплота испарения влаги; α_q – коэффициент внешнего теплообмена; разность $\Delta t = t_c - t_n$ температур при конвективном теплоподводе (температуры сухого и смоченного термометров соответственно); R_n – удельная теплота парообразования.

Результаты исследований

Анализ выражений (7) и (8) показывает, что коэффициент α_R возрастает при $P \to 0$, т.е. при $P_{гл} = P_{ак}$, что соответствует максимально возможному испарению влаги

$$i_{\max} = \alpha_R \cdot B. \tag{10}$$

Из работ В.В. Романова, К.К. Павловой, К.Е. Иванова [7] следует, что коэффициент приведенного испарения α_R с погрешностью (5÷13) % может быть определен из формулы (10) с учетом относительных затрат энергии E на испарение влаги [7]. Данные выводы относятся и к сушке торфа различных типов и видов (верховой сосново-пушицевый, $R_Т$=25 %, $W_н = 2{,}5$ кг$_{вл}$/кг$_{сух}$; переходный, $W_н = 5{,}1$ кг$_{вл}$/кг$_{сух}$; низинный осоковый торф, $R_Т$=20-25 %, $W_н = 4{,}27$ кг$_{вл}$/кг$_{сух}$) в толстых слоях при $h_i < H_{кр}$ [4].

Так для $H_0 = 100 \div 20$ мм значения α_R составили $(3{,}70 \div 2{,}78) \cdot 10^{-7}$ кг/Дж, что мало отличается от данных, полученных О.А. Белоцерковской [7] при сушке фрезерного торфа средней степени разложения, которая экспериментально показала, что α_R зависит от внешних условий сушки и свойств испарившейся жидкости.

Анализ зависимости $iL/B = f(H_{ост})$ показывает, что коэффициент α_R зависит и от толщины расстила торфа (таблица 1, рисунок 1) с экстремумом при $H^*_{ост} \approx 30$ мм. Последний характеризует состояние навала (слоя), при котором около 50 % от радиационного баланса B тепловой энергии перераспределяется в нижележащие слои торфа нарушенной структуры, или подстилающей залежи [4]. Учитывая сказанное, дальнейшая сушка остаточного слоя торфа при послойной уборке в технологии полевого обогащения торфяного сырья нецелесообразна из-за высокой потери тепловой энергии при любых $H_{кр}$. Таким образом, следующий цикл сушки следует начинать с добавления к остаточному слою $H^*_{ост}$ торфяного сырья известной влажности до такой толщины, которая соответствовала бы $H_{кр}$ при данной влажности: $\Delta H = H_{кр} - H^*_{ост}$. В этом случае на испарение влаги при сушке верхних относительно тонких слоев ($h = 14 \div 20$ мм) будет использоваться максимальное количество тепловой энергии с ее аккумуляцией $P_{ак}$ в навале торфа нарушенной структуры [5].

Таблица 1

Зависимость удельной теплоты испарения α_R от толщины слоя $H_{ост}$

Толщина остаточного слоя $H_{ост}$, мм	Удельная теплота испарения		Примечание
	$\alpha_R \cdot 10^5$, кг/Дж	$l_u \alpha_R$	
100	0,040	-14,73	[5]
100*	0,037	-14,80	[7]
70	0,030	-15,00	[5]
50	0,024	-15,24	[5]
30	0,022	-15,32	[5]
20*	0,0278	-15,10	[7]

Другой особенностью коэффициента α_R в формулах (7) и (10) является отсутствие учета доли тепловой энергии, поступающей в слой за счет конвективного теплообмена (9). Для оценки этой связи приравняем формулы (7) и (8):

$$\alpha_R (B - P) = \frac{B + \alpha_q (t_c - t_n)}{R_n} \tag{11}$$

и найдем, что

$$\alpha_R = \frac{B + q_k}{L(B - P)} = \frac{q_0}{L(B - P)} = \frac{q_0}{L \cdot \Delta q}, \tag{12}$$

где $q_0 = B + q_k$, $\Delta q = B - P$. Зависимость (12) подобна используемой ранее [7], выраженной через градиенты температуры и удельной влажности воздуха на высоте 0,5 и 2 м при известных значениях L и удельной теплоемкости C_P. В нашем случае зависимость (12)

указывает на связь коэффициента α_R с суммарным потоком тепловой энергии q_0 и его остатком ($\Delta q = B - P$), получаемым после учета затрат тепла на теплоаккумуляцию

$$P_{ак} = \sum h_i (C\gamma_i) \Delta t_\tau \frac{1}{\tau}, \tag{13}$$

и глубинного оттока $P_{гл}$ в нижележащие слои,

$$P_{гл} = -\lambda' \frac{\Delta t_h}{h}, \tag{14}$$

где $C\gamma_i$ – объемная теплоемкость, Дж/м^{3}К; $C\gamma_i = C\gamma_c (1 + W_i) = \gamma_c (C_T + C_в W)$; т.е. $C_T = 1{,}97 \cdot 10^3$ – теплоемкость твердой фазы торфа Дж/кг·К; $C_в = 4{,}18 \cdot 10^3$ – теплоемкость воды Дж/кг·К; γ_c – плотность сухой части торфа при $W = W_i$; λ', a – эффективные значения коэффициентов тепло- и температуропроводности (λ', Вт/м·К; a, м^2/с), $\lambda' = C\gamma_i a$. Причем, при толщине сушимого слоя $H_{ост} = 80$ мм $P_n = \tau \cdot P = P_{ак} + 0{,}19 P_{гл}$, а при $H_{ост} = 15$ мм $P_n = P_{гл} + 0{,}12 P_{ак}$ (сосново-пушицевый торф, $R_T = 25\%$), т.е. в первом случае можно не учитывать затраты тепла на $P_{гл}$ (ошибка – 19 %), а во втором можно не учитывать $P_{ак}$ (ошибка – 12 %) [7].

Соответственно, выражение для интенсивности испарения с учетом формулы (7) при $h_i > H^*_{ост}$ принимает вид:

$$i_u \approx \alpha_R (B - P_{ак}), \tag{15}$$

а при $h_i < H^*_{ост}$,

$$i_u \approx \alpha_R (B - P_{гл}). \tag{16}$$

Значит, при $h_i = H^*_{ост}$ должен быть экстремум, т.к. зависимость $i_u = f(H_{отс})$ будет падающей (15), а зависимость $i_u = f(H_{отс})$ согласно (16) будет возрастающей согласно схеме на рисунке 2. [3]. Тогда точка пересечения кривых при $P_{ак} = P_{гл}$ дает экстремум с координатами $i_{кр}$, $H_{ост}$. Следовательно, при $H_{ост} > H^*_{ост}$ наблюдается спад интенсивности сушки в навале. По данным работы [7], точка пересечения кривых при сушке фрезерного торфа (сосново-пушицевый, $R_T = 25\%$) приходится на $H_{ост} \approx 40$ мм, что соответствует ходу кривых на рисунке 1 для $\alpha_R = f(H)$, $H_{ост} = 35$ мм.

Это состояние слоя торфа связано с толщиной зоны испарения $h_{зи}$. Последняя, по данным А.Е. Афанасьева [2], может быть определена из соотношения:

$$h_{зи} = H_{ост} \sqrt{\frac{1}{1+W}}. \tag{17}$$

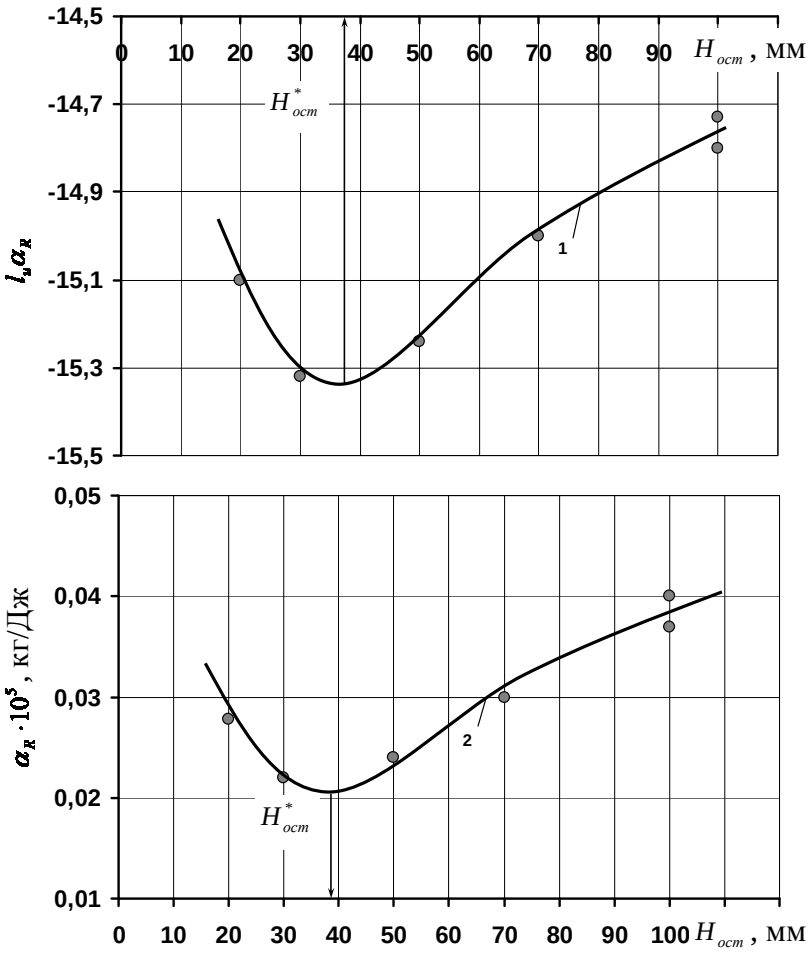

Рисунок 1. Зависимость удельного испарения α_R от толщины остаточного слоя $H_{ост}$ верхового пушицево-сфагнового торфа $R_T = 25 \div 30\%$, $W_н = (2{,}5 \div 5{,}1)$ кг$_{вл}$/кг$_{сух}$, и обработка данных экспериментальной зависимости $iL/B = f(H_{ост})$, при $L = 22{,}6 \cdot 10^5$ Дж/кг по [7]

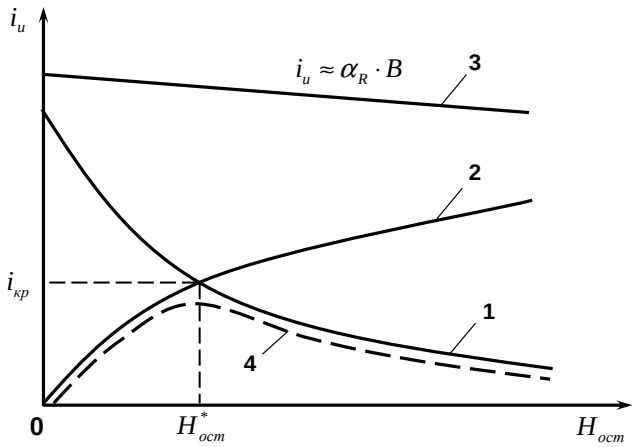

Рисунок 2. Схема изменения интенсивности сушки i_u от толщины навала торфа при $H_{ост} \le H_{кр}$: кривая 1 (по формуле (13)), кривая 2 (по формуле (14)), зависимость 3 (по формуле 10), кривая 4 – предполагаемая зависимость (по формулам (7) и (12))

Поэтому при $H_{ост} = H^*_{ост}$, $i_{кр} < i_u$ (см. графики 3 и 4 на рисунке 2) вычисляемой по формуле (10).

Анализ функции (7) на экстремум подтверждает рассмотренные результаты (рисунки 2 и 3).

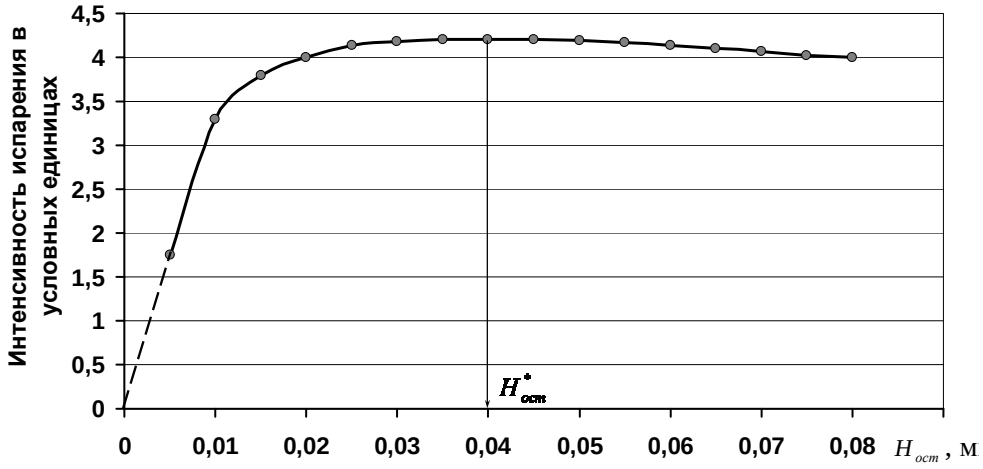

Рисунок 3. Теоретическая зависимость интенсивности испарения от толщины расстила. Обработка данных [6,8]

Выполненные аналитические и экспериментальные исследования показывают, что при реализации существующих технологических схем полевого производства торфяной продукции не в полной мере используются потенциальные возможности интенсификации удаления влаги из торфа. В частности, параметры слоя сушки и характеристики основания расстила не являются рациональными с точки зрения утилизации тепловой энергии. В работе показано, что с ростом h_i величина интенсивности испарения i_u растет при $H_{ост} < H^*_{ост}$ (формула (16)), а при $H_{ост} > H^*_{ост}$ i_u убывает (формула (15), что связано с колебаниями значений удельного испарения α_R (рисунок 1) из-за изменения теплового P и радиационного B балансов согласно формуле (12), подтверждаемыми в первом приближении теоретическими данными (сравнение графиков на рисунке 2 (график 4) и рисунке 3). Максимум интенсивности испарения приходится на толщину слоя ≈ 0,04 м, но это не значит, что именно такая толщина слоя является оптимальной при реализации технологического процесса сушки торфяного сырья в полевых условиях. При увеличении толщины слоя (сушка в толстых слоях) увеличивается и общее количество испаренной влаги (рисунок 3).

Заключение

Результаты исследований процессов тепломассопереноса в торфяных системах и полученные результаты позволяют сделать выводы о потенциальных возможностях интенсификации полевой сушки торфяного сырья.

Продолжительность полевой сушки торфа в расстиле зависит от уборочного влагосодержания. Так, если убирать торф из толстого расстила влажностью 65 %, то

дальнейшая сушка может продолжаться и в штабеле. С учетом ранее полученных данных по гравитационному обезвоживанию торфа нарушенной структуры [9,10] при условии послойной уборки толстого расстила, а также при уборке всего толстого расстила с последующей досушкой торфяного сырья в промежуточном штабеле следует, что рациональное значение толщины расстила торфяного сырья при гравитационном обезвоживании и радиационно-конвективной сушке в зависимости от изменяющихся внешних условий находится в диапазоне от 0,100 до 0,175 м.

Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при создании, рационализации и интенсификации прогрессивных технологических процессов при добыче торфа.

Список литературы

1. Антонов В.Я., Малков Л.М., Гамаюнов Н.И. Технология полевой сушки торфа. М.: Недра, 1981. 239 с.
2. Афанасьев А.Е. Интенсивность и продолжительность сушки крошкообразного торфа// Торф и бизнес. 2008. № 3(13). С. 31-35.
3. Афанасьев А.Е. Физические процессы торфяного производства: учебное пособие. Тверь: ТГТУ, 2005. 208 с.
4. Афанасьев А.Е. Физические процессы тепломассопереноса и структурообразования в технологии торфяного производства: Дисс. … д-ра техн. наук. – Калинин, 1984. – 611 с.
5. Афанасьев А.Е., Болтушкин А.Н. Процессы сушки дисперсных материалов: учебное пособие. – Тверь: ТГТУ, 2011. – 152 с.
6. Афанасьев А.Е., Дорогов В.С. Методика расчета характеристик сушки фрезерного торфа // Вестник ТвГТУ: Научный журнал. – Тверь: ТвГТУ, 2005. – Вып.6. – С. 142-146.
7. Афанасьев А.Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. – М.: Недра, 1992. – 288 с.
8. Дорогов В.С., Афанасьев А.Е. Теоретические предпосылки выбора оптимальной толщины расстила фрезерной крошки // Матер. междунар. конфер. «Торф в решении проблем энергетики, сельского хозяйства и экологии» 29 мая – 2 июня 2006 г. – Минск: Республика Беларусь. – С. 32-35.
9. Кремчеев Э.А. Гравитационное обезвоживание навала торфяного сырья с учетом испарения влаги / Э.А. Кремчеев, А.Е. Афанасьев, А.С. Ефремов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Горная книга, 2013. – № 3. – С. 93-103.

10. Кремчеев Э.А. Оценка эффективности гравитационного обезвоживания сырья при комплексной механизации круглогодовой добычи торфа / Э.А. Кремчеев, А.Е. Афанасьев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Горная книга, 2012. – № 4. – С. 50-58.
11. Кремчеев Э.А. Теоретическая оценка коэффициентов влагопроводности торфяной залежи нарушенной структуры / Э.А. Кремчеев, А.Е. Афанасьев, А.С. Ефремов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Тематическое приложение «Гидромеханизация». – М.: Горная книга, 2012. – Вып. 6. – С. 90-100.
12. Малков Л.М. Определение величины испарения с поверхности торфяных массивов // Торфяная промышленность. – 1970. – № 6. – С.4-6.
13. Чудновский А.Ф. Теплофизика почв. – М.: Наука, 1976. – 353 с.

Рецензенты:

Пашкевич М.А., д.т.н., профессор, директор ЦКП, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург.

Иванов С.Л., д.т.н., профессор кафедры машиностроения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург.