

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫСОТЫ СЛОЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПРИ ПОЛЕВОМ ОБОГАЩЕНИИ ТОРФА В РАСШИРЕННОМ СЕЗОНЕ КАРЬЕРНОЙ ДОБЫЧИ

Кремчев Э.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, дом 2), e-mail: kremcheev@mail.ru

Проведены теоретические и экспериментальные исследования торфа в приложении к технологиям метенезависимой добычи и полевого обогащения торфяного сырья. Показана возможность теоретической оценки коэффициентов влагопроводности различных типов и видов торфяного сырья от предельной высоты навала через изменение коэффициента фильтрации. Исследования проведены для различных типов и видов торфа с учетом степени разложения, пористости, интенсивности потока влаги. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований рекомендуются к использованию разработанные теоретические подходы для выбора и оценки эффективности технологических решений полевого обогащения торфяного сырья.

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

ESTIMATION OF LIMIT VALUES OF DEHYDRATION'S LAYER HEIGHT DURING FIELD ENRICHMENT OF PEAT IN HIGH SEASON OF QUARRYING

Kremcheev E.A.

Mining University, Saint-Petersburg, Russia (199106, Saint-Petersburg, V.O. 21-line, 2), e-mail: kremcheev@mail.ru

Theoretical and experimental researches for peat are carried out in addition to technologies of weather independent mining and field enrichment of peat raw materials. Possibility of theoretical hydraulic conductivity coefficients' estimation for various types and kinds peat raw materials depended on ceiling bulk through filtration coefficient change is shown. Research is carried out for various types and kinds in consideration of degree of dissolution, pore content, intensity of flow moisture. The developed theoretical approaches are recommended to use for choice and estimation of efficiency of technological concepts field enrichment of peat raw materials on the basis of carried out theoretical and experimental researches.

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

При изучении влагопроводности переувлажненной торфяной залежи нарушенной структуры под действием гравитационных P_g и капиллярно-осмотических сил P_k создаются условия, когда $P_k = P_g$, при которых интенсивность i_g потока влаги стремится к нулю ($i_g \rightarrow 0$), а высота слоя торфа h стремится к предельной (минимальной) $H_{кр} = const$ при соответствующем значении эффективного радиуса пор r . После достижения навалом торфа критической высоты обезвоживание прекращается, и для дальнейшего удаления влаги требуется механический отжим сырья или проведение операций по сушке торфа (полевая сушка или сушка в заводских условиях).

Данная работа выполняется в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, и является продолжением статьи [5], где были представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влагопроводности нарушенного торфяного массива без учета потери влаги в результате испарения.

В результате выполненных исследований выявлено, что при $r_k = 20 \text{ мкм}$ $P_k \rightarrow P_g$, т.е. водопоглощение стремится к минимальной величине. В нашем случае этому r_k соответствует высота навала торфа 0,692 м при температуре $T = 273 \text{ К}$. При этом полагаем, что обезвоживание O_θ и водопоглощение B_n для модели пористого тела отличаются только направлением потока влаги. Более надежными будут результаты, полученные при использовании реальных сред. В этой связи в формулу для $H_{кр}$, полученную из условия $P_k = P_g$, необходимо ввести коэффициент β , учитывающий особенности структуры и косвенно отражающий сопротивление переносу влаги:

$$H_{крЭ} = H_{крТ} \cdot \beta = \beta \cdot \frac{2\sigma \cos \Theta}{r\rho_{жс}g}. \quad (1)$$

где $H_{крЭ}$, $H_{крТ}$ – экспериментальные и теоретические значения критической толщины слоя торфа. Выражение (1) можно записать и для текущих значений высоты слоя, подверженного осадке, $h_\theta = h_T \cdot \beta$.

Поэтому формула для интенсивности потока влаги в торфе принимает вид:

$$i_g = -k_\theta \beta \frac{P_k - P_g}{H_{кр}} = k_{эф} \frac{P_k - P_g}{H_{кр}}, \quad (2)$$

где $k_{эф} = k_\theta \beta$ – эффективный коэффициент влагопереноса; k_θ – коэффициент влагопроводности; β – эмпирический коэффициент, зависящий от характеристик торфяного сырья, уточняющийся из результатов конкретных экспериментальных исследований: $\beta = h_\theta/h_T = H_\theta/H_T$, таким образом, для реальных сред значения $H_{кр}$ и интенсивность влагопереноса i_g будут меньше по сравнению с теоретическими значениями, полученными для капиллярной модели:

$$i_g = -k_\theta \left(\frac{2\sigma \cos \Theta}{rh_i} - \rho_{жс}g \right) \quad (3)$$

Теоретическая оценка коэффициента влагопроводности осуществляется на основе использования следующего уравнения:

$$k_\theta = \frac{i_g}{\left(\frac{2\sigma \cos \Theta}{rh_i} - \rho_{жс}g \right)} = k_n i_g, \quad (4)$$

где $k_n = const$ при заданных постоянных значениях r и h_i , и определяется из углового коэффициента зависимости $k_\theta = f(i_g)$.

Использование преобразованного уравнения (4) сводится к теоретической оценке k_h , а i_g вычисляется через максимальное значение коэффициента фильтрации k_ϕ (м/с), $i_g = \rho_{ж} k_\phi$, для начального состояния нарушенной, переувлажненной торфяной залежи или экспериментально определяется для различных условий обезвоживания. Величина i_g в уравнении будет отражать максимальное значение потока влаги. Следовательно, возможно получить максимальную величину коэффициента влагопроводности $k_\epsilon = \max$.

$$k_\epsilon = \rho_{ж} k_\phi \frac{dk_\epsilon}{di_g}. \quad (5)$$

После преобразования получаем дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{dk_\epsilon}{di_g} - \lambda_p k_\epsilon = 0, \quad (6)$$

где $\lambda_p = (\rho_{ж} k_\phi)^{-1}$, м²с/кг(в). λ_p – характеризует обратную величину интенсивности влагопереноса.

Разделим переменные и проинтегрируем (6), в результате окончательно получим, что

$$k_{\epsilon 2} = k_{\epsilon 1} \exp[-\lambda_p (i_1 - i_2)], \quad (7)$$

где индексы 1 и 2 соответственно отражают минимальную (начальную) и максимальную (текущую) величину параметра.

Зависимость (7) подобна уравнению связи коэффициента фильтрации k_ϕ с коэффициентом пористости ϵ , которая для малых перепадов давления в торфяной залежи имеет вид [2]:

$$k_{\phi 2} = k_{\phi 1} \exp[-\alpha_\phi (\epsilon_1 - \epsilon_2)], \quad (8)$$

где $(k_{\phi 1}, \epsilon_1)$ – начальные, а $(k_{\phi 2}, \epsilon_2)$ – текущие значения параметров.

Коэффициент пористости ϵ связан с общей пористостью n .

Коэффициент α_ϕ – характеризует уменьшение водопроницаемости (в нашем случае влагопроводности) торфа при его уплотнении (уменьшении эффективного радиуса пор), и в зависимости от состава и структуры торфа принимает значения в диапазоне от 1 до 3. С ростом степени разложения R_T и уменьшением ϵ_1 значения α_ϕ возрастают [3]: $\alpha_\phi = 0,123 \exp(0,057 R_T)$, $\alpha_\phi = (17,1/\epsilon_2) - 0,39$.

В нашем случае последнее уравнение отличается коэффициентами $\alpha_\phi = 21,6(1/\epsilon_2) - 1,7$. Это вызвано меньшей выборкой данных (таблица 1) по сравнению с [3].

Таблица 1 – Изменение характеристик влагопереноса различных типов и видов торфа

№ п/п	Тип / вид торфа	Степень разложения $R_T, \%$	Полная влагоемкость		Коэффициент фильтрации $k_f \cdot 10^{10}, \text{ м/с}$	Интенсивность влагопереноса $i_g \cdot 10^6, \text{ кг/м}^2\text{с}$	Общая пористость n	Коэффициент пористости ε_2	Коэффициент влагопроводности $k_e \cdot 10^{-10}, \text{ с}$	Фильтрационный показатель $\alpha_f, \text{ б/р}$	$1/\varepsilon_2$
			$W_{ne}, \text{ кг(в)/кг з(с)}$	$\omega_{ne}, \%$							
Низинный											
1	Древесно-осоковый	36	9,4	90,4	2,51	0,27	0,904	9,4	0,255	0,96	0,106
2	Осоково-гипновый	22	11,7	92,1	3,36	0,36	0,921	11,7	0,342	0,43	0,085
3	Осоковый	28	10,4	91,2	1,99	0,21	0,912	10,4	0,203	0,61	0,096
4	Гипновый	26	10,4	91,2	1,42	0,15	0,912	10,4	0,145	0,54	0,096
Переходный											
5	Древесно-осоковый	39	9,8	90,7	2,07	0,22	0,907	9,8	0,211	1,14	0,102
6	Шейцериевый	26	10,7	91,4	1,83	0,2	0,914	10,7	0,187	0,54	0,093
7	Древесный	44	7,6	88,4	4,18	0,45	0,884	7,6	0,426	1,51	0,131
8	Древесно-сфагновый	35	8,9	89,9	2,05	0,22	0,899	8,9	0,209	0,904	0,112
9	Осоково-сфагновый	28	11,1	91,7	0,65	0,07	0,917	11,1	0,066	0,61	0,09
Верховой											
10	Шейцериово-сфагновый	23	10,3	91,2	0,46	0,05	0,912	10,3	0,047	0,456	0,097
11	Пушицево-сфагновый	31	11,2	91,8	0,44	0,047	0,918	11,2	0,045	0,72	0,089
12	Сосново-пушицевый	39	11,2	91,8	0,023	0,0025	0,918	11,2	0,002	1,14	0,089
13	Магелланикум	16	13,5	93,1	0,72	0,077	0,931	13,5	0,073	0,31	0,074

Примечания: плотность жидкости принята по [6] для $T = 293 \text{ K}$, $\rho_{жс} = 1,075 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Следовательно, коэффициенты α_f и λ_p подобны, т.к. оба в конечном счете связаны с интенсивностью влагопереноса и его изменением из-за варьирования эффективных радиусов пор и критической высоты слоя $H_{кр}$, создающего давление на структуру торфа. Как правило, с ростом $H_{кр}$ (а, следовательно, и давления) размер пор уменьшается (рис. 1) [4].

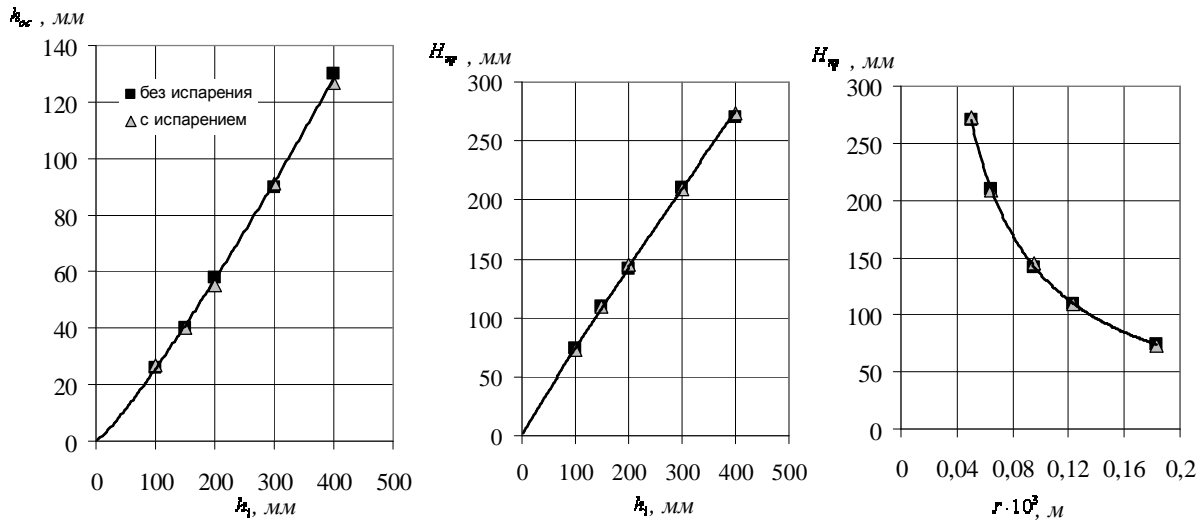


Рис. 1. Зависимость осадки и критической толщины от высоты слоя обезвоживания h_i и радиуса пор r без испарения и с его учетом для верхового шейцерицево-сфагнового торфа, $R_T = 22 - 25 \%$, $T = 293 K$, $\varphi = 0,47$.

Выражение (8) можно записать через интенсивность влагопереноса i_g :

$$i_2 = i_1 \exp[-\alpha_\phi (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)], \quad (9)$$

где $i_1 = \rho_{жс} \cdot k_{\phi 1}$, $i_2 = \rho_{жс} \cdot k_{\phi 2}$. Этот подход позволяет оценить коэффициенты влагопроводности k_g для нарушенной структуры торфа без учета испарения влаги.

Анализ формулы (4) показывает, что для $h_i = H_{кр}$, $k_\phi \rightarrow 0$, $i_g \rightarrow 0$, $k_g \rightarrow 0$. Тогда k_g будет связан одновременно и с радиусом пор r (таблица 1 [4]). Оценим взаимосвязь коэффициента влагопроводности с фильтрационными свойствами торфа. Для этого решим уравнение (7) относительно $(i_2 - i_1)$, приравняем его к уравнению (9) и упростим полученные выражения, разложив экспоненциальную функцию в ряд и воспользовавшись ее первыми двумя слагаемыми. С учетом того, что $\lambda_p = (\rho_{жс} \cdot k_\phi)^{-1}$ получим:

$$\left(\frac{k_{a2}}{k_{a1}} \right)^{\lambda_\delta i_1} \approx [1 - \alpha_\delta (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)], \quad (10)$$

$$i_2 \approx i_1 \left[1 + \frac{1}{\lambda_\delta i_1} \left(\ln \frac{k_{a1}}{k_{a2}} \right) \right]. \quad (11)$$

Таким образом, можно оценить влагопроводность и через изменение коэффициентов фильтрации на начальном $P_k \rightarrow 0$ и конечном $i_g \rightarrow 0$ этапах обезвоживания при условии:

$$P_k \rightarrow 0, \quad i_g = i_u \rightarrow 0, \quad (12)$$

где i_u – интенсивность испарения с влажной поверхности торфа.

С учетом формул (3) и (10) следует, что максимальный коэффициент влагопроводности можно записать как:

$$k_{e2} = \frac{k_{\phi 2}}{g}, \quad k_{a2} \approx k_{a1} [1 - \alpha_{\phi} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)]^{k_{\phi i_1}}. \quad (13)$$

Таким образом, коэффициент влагопроводности должен иметь минимум (рис. 2) с ростом α_{ϕ} (степени разложения, рис. 1) и уменьшением коэффициента пористости ε_1 . Изменение k_{e2} показано в таблице 1 в зависимости от типа, вида и степени разложения R_T торфа, коэффициента пористости ε_2 , полной влагоемкости ω_{ne} и интенсивности влагопереноса i_g .

Анализ таблицы 1 показывает, что максимальное значение коэффициента влагопроводности для верхового типа торфа принимает наименьшие значения ($k_{e2} = (0,002...0,073) \cdot 10^{-10} c$) по сравнению с переходным ($k_{e2} = (0,066...0,426) \cdot 10^{-10} c$) и низинным ($k_{e2} = (0,145...0,342) \cdot 10^{-10} c$) и убывает с ростом степени разложения R_T (рисунок 2).

В пределах каждой группы торфов (табл. 1, рис. 2) k_{e2} растет при $R_T > (30 - 32)\%$. При меньших значениях степени разложения величина коэффициента влагопроводности убывает с ростом степени разложения $R_T = (20 - 32)\%$. В частности, для сосново-пушицевого торфа значение $\alpha_{\phi} = 1,14$ ($R_T = 39\%$), а для магелланикума $\alpha_{\phi} = 0,31$ ($R_T = 16\%$) при соответствующих коэффициентах пористости ε_2 , равных 11,2 и 13,5, т.е. укладываются в те пределы, которые даны в [3] для различных групп водопроницаемости (высокой $\alpha_{\phi} < 3,5$, средней $\alpha_{\phi} = 0,35 - 0,75$, низкой $\alpha_{\phi} > 0,75$). Поэтому для одного типа торфа характеристики влагопроводности будут так же изменяться, как и фильтрационные характеристики ($\alpha_{\phi} = f(R_T)$), т.е. будут иметь минимум (рис. 2).

Следовательно, основными факторами, влияющими на влагоперенос, являются степень разложения, изменяющаяся 2,43 раза, коэффициент пористости, изменяющийся в 1,2 раза и коэффициент влагопроводности, изменяющийся в 36,5 раза (таблица 1, позиции № 12, 13). Таким образом, верховой тип торфа составляет исключение в связи с резко выраженной неоднородностью структуры из-за возможного наличия пограничного горизонта повышенной степени разложения, чередующегося с обычной структурой пониженной R_T . Даже при одинаковой R_T (например, позиции 5 и 12 таблицы 1), но разного типа и вида значения k_{e2} отличаются в 100 раз, что имеет место и в отношении коэффициентов фильтрации k_{ϕ} и интенсивности i_g при мало изменяющихся ε_2 и ω_{ne} . Это обстоятельство

обусловлено уменьшением градиента перепада давлений dP/dx [4] за счет снижения капиллярного давления вследствие гидрофобизации твердой фазы, обладающей повышенным содержанием битумов [2; 4]. В воде торфа верхового типа содержатся также различные растворенные органические вещества: моносахариды, пентозы, уроновые и гуминовые кислоты, битумы, высоко- и низкомолекулярные органические и минеральные вещества. Последние могут находиться в коллоидном, молекулярном и ионном состояниях [6]. Эти особенности структуры твердой и жидкой фаз приводят к уплотнению торфа, который относится к легкодеформируемым системам. Даже при давлении $P_g \approx 50 \text{ кПа}$ [3] происходит осадка торфа, что приводит к повышению сопротивления β (формула (5)) потоку влаги.

Следовательно, с ростом степени разложения R_T уменьшается размер капилляров (пор). Это обстоятельство способствует проявлению капиллярно-осмотических и поверхностных сил, что приводит к вариации значений. Данные обстоятельства приводят к вариации значений k_{e2} (рис. 2). По аналогии с коэффициентом фильтрации [3] она составляет от 10 до 60%.

Для переходного и низинного типов торфяной залежи граничные величины при максимальной и минимальной степени разложения показаны в таблице 1. Значения показателя α_ϕ укладываются в те же пределы, что и для верхового типа при возросших коэффициентах влагопроводности (10...100 раз) и незначительно отличающихся коэффициентах пористости ($\varepsilon_2 = 7,6...11,1$ для переходного типа; $\varepsilon_2 = 9,4...11,2$ для низинного типа) по сравнению с верховым ($\varepsilon_2 = 10,3...13,5$). Значит, за влагопроводность в большей степени несет ответственность состав переносимой влаги, при мало изменяющихся характеристиках твердой фазы. Это обстоятельство подтверждается физико-химическими свойствами дисперсионной среды переходного и низинного типов [2; 4].

Так, минерализация воды верховых торфяных залежей составляет 40-70 мг/л, а для переходного и низинного она соответственно возрастает в 1,8-2,6 раза и 4,2-10 раз. Преобладающим в минеральной части является кальций и его водорастворимые соединения. Кальций относится к основным структурообразователям торфа, обеспечивающим изменения размеров пор. Катионы кальция определяют и биохимический процесс. Они нейтрализуют кислотность. Причем ионообменные процессы протекают в основном в кислой среде, так как $pH < 7$. Значения pH болотных вод возрастают от верховых к переходным и низинным типам торфяных залежей, т.е. с уменьшением их кислотности, что соответствует и большему содержанию кальция (до 15-85 мг/л) в низинных по сравнению с верховыми болотными водами (до 15 мг/л).

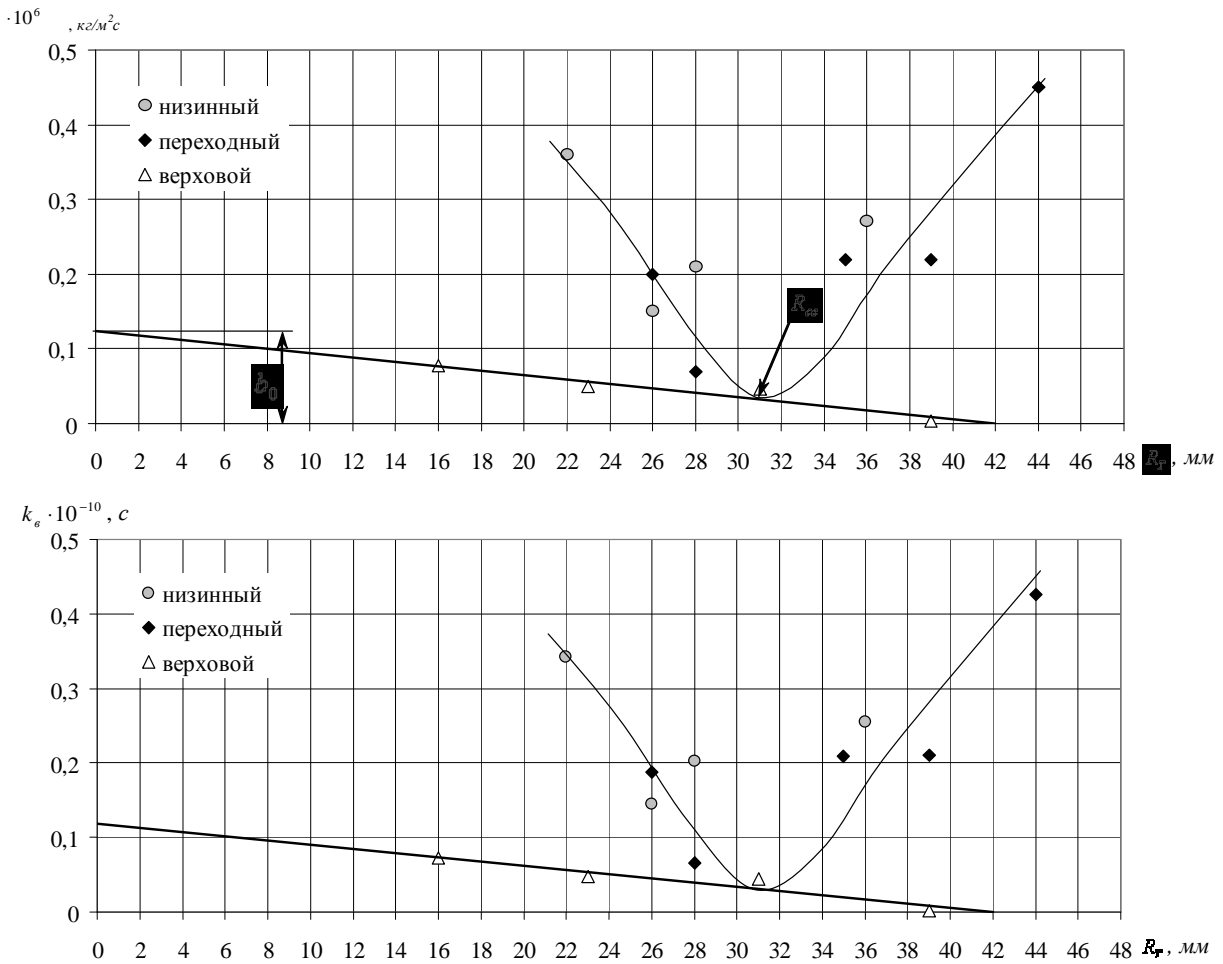


Рис. 2. Зависимость максимальной интенсивности влагопереноса i_g и коэффициента влагопроводности k_2 от степени разложения R_T торфяной залежи нарушенной структуры без учета испарения для верхового, низинного и переходного типов торфа при $T = 293 \text{ K}$.

Особенностью интенсивности влагопереноса i_g служат зависимости $i_g = f(R_T)$ (рис. 2). Для верхового типа залежи она линейная

$$i_g = b_0 - \alpha_g R_T, \quad (14)$$

где $b_0 = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^2\text{с}$, $\alpha_g = di_g/dR_T$ – угловой коэффициент зависимости (14), $\alpha_g = 0,33 \cdot 10^{-8} \text{ кг/м}^2\text{с}\%$. Для переходного и низинного типов торфа эта зависимость имеет минимум при $R_T = (30-32)\%$. Минимум имеет роль обобщенной точки при $\langle R_T \rangle = 31\%$. Назовем ее средней эффективной связующей степенью разложения $\langle R_{ce} \rangle$, исходя из которой можно выйти на любой тип торфа: $\langle R_{ce} \rangle = 31\%$, $i_g = 0,037 \cdot 10^{-6} \pm 0,008 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^2\text{с}$. При этом для верхового типа при $R_T \rightarrow 0$, $i_g = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^2\text{с}$ (экстраполированное значение), а для переходного и низинного типа оно значительно больше (рис. 2). С

увеличением R_T для верхового типа $i_g \rightarrow 0$, из-за проявления реологических свойств воды: роста предельного напряжения сдвига и плотности связанной воды [1] с уменьшением размеров пор. Для переходного и низинного типов i_g стремится к константе с неявным проявлением границы, из-за роста коэффициента сопротивления β переноса влаги.

В связи с изложенным можно отметить, что при фильтрационном равновесии ($i_g \rightarrow 0$, $P_k \rightarrow P_g$, $h_i \rightarrow H_{кр}$) количество оставшейся влаги в навале и $H_{кр}$ будут коррелировать с коэффициентами влагопроводности, пористости, размеров пор, высоты навала торфа, т.е. в верховом типе торфяного сырья масса оставшейся влаги M_e будет больше переходного M_n и низинного M_n . Эта особенность изменения влагопроводности подтверждается экспериментальными данными по оценке осадки, критической толщины навала в зависимости от начальной толщины h_n шейхцериево-сфагнового торфа и изменения $H_{кр} = f(r)$, что соответствует теоретическим данным, рассмотренным выше.

Это обстоятельство и определяет дальнейший набор технологических приёмов по обезвоживанию торфа при непрерывном производстве разнообразной качественной продукции.

Удовлетворительная сходимость экспериментальных данных с результатами проведенных теоретических исследований позволяет рекомендовать используемые теоретические подходы при выборе и оценке эффективности вновь предлагаемых технологических решений по полевому обогащению торфяного сырья, что обеспечит значительную экономию временных и материальных ресурсов при проектировании торфяных предприятий с расширенным сезоном добычи торфа, осуществляющих добычу торфяного сырья повышенной влажности.

Автор выражает искреннюю признательность профессору ТГТУ Афанасьеву Алексею Егоровичу за оказанную методическую помощь и ценные консультации при проведении теоретического этапа исследований.

Список литературы

1. Афанасьев А.Е. Влияние структурообразования на плотность жидкости коллоидных капиллярно-пористых тел / А.Е. Афанасьев, А.С. Ефремов // ТОХТ. – 2011. – Т. 46. – № 1. – С. 119-125.
2. Афанасьев А.Е. Физические процессы торфяного производства : учебное пособие. – Тверь : ТГТУ, 2005. – 208 с.

3. Базин Е.Т. Технический анализ торфа / Е.Т. Базин [и др.]; под общей редакцией Е.Т. Базина. – М. : Недра, 1992. – 431 с.
4. Базин Е.Т. Влияние технологических и физико-химических воздействий на водопроницаемость и структуру торфа / Е.Т. Базин, В.И. Косов, С.В. Миняев // Торфяная промышленность. – 1981. – № 7. – С. 17-20.
5. Кремчеев Е.А. Оценка эффективности гравитационного обезвоживания сырья при комплексной механизации круглогодичной добычи торфа / Э.А. Кремчеев, А.Е. Афанасьев // ГИАБ. – 2012. – № 4. – С. 50-58.
6. Лиштван И.И. Основные свойства торфа и методы их определения / И.И. Лиштван, Н.Т. Король. – Минск : Наука и техника. – 1975. – 320 с.

Рецензенты:

Пашкевич Мария Анатольевна, профессор, директор ЦКП, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург.

Михайлов Александр Викторович, профессор кафедры машиностроения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург.