УДК 622.641.047: 552.577: 542.67

Э.А.КРЕМЧЕЕВ, *канд. техн. наук*, *доцент*, *kremcheev@spmi.ru*
Д.О.НАГОРНОВ, *канд. техн. наук*, *ассистент*, *bars32nag@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «*Горный*», *Санкт-Петербург*

E.A.KREMCHEEV, *PhD in eng. sc*., *associate professor*, *kremcheev@spmi.ru*
D.O.NAGORNOV, *PhD in eng. sc*., *assistant lecturer*, *bars32nag@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *Saint Petersburg*

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ВЛАГИ ПРИ ПОЛЕВОМ ОБОГАЩЕНИИ ТОРФА В ТОЛСТОМ РАССТИЛЕ

Показана возможность применения модели равновесного состояния нарушенной торфяной системы при оценке эффективности гравитационного обезвоживания навала торфяного сырья без учета испарения влаги с поверхности в зависимости от высоты, критической толщины, интенсивности потока и количества влаги в слое после осадки.

***Ключевые слова*:** торф, фильтрация, полевое обогащение, изменение влагосодержания, технология добычи.

MODEL OF MOISTURE MOVEMENT IN FIELD DRESSING OF PEAT IN THE LARGE SPREADING

The possibility of using the model equilibrium disturbed peat system to assess the effectiveness of gravitational drainage of the peat material hill without evaporation from the surface, depending on the height of the critical thickness, flow rate and the amount of moisture in the layer after deposition.

***Key words*:** peat, filtering, field dressing, changing the moisture content, the technology of production.

В технологических решениях добычи и полевой переработки торфа большая часть рекомендаций дается на основании экспериментальных исследований, адаптация которых к изменяющимся метеорологическим условиям конкретного района расположения торфяного предприятия достаточно сложна и требует проведения повторных экспериментальных исследований. Снижение трудоемкости процесса адаптации технико-технологических решений и решение проблемы создания универсального подхода, позволяющего разрабатывать адаптивные торфопредприятия с расширенным сезоном добычи сырья, требуют глубокого теоретического обоснования процессов движения влаги в слое торфа нарушенной структуры и оценки эффективности процесса влагопереноса в комплексе технологических операций.

При изучении влагопроводности переувлажненной торфяной залежи нарушенной структуры под действием гравитационных сил $P_г$ и капиллярно-осматических $P_к$ создаются условия, когда $P_к = P_г$, интенсивность i_g потока влаги стремится к нулю ($i_g \to 0$), а высота слоя торфа h стремится к предельной (минимальной) $H_{кр} = \text{const}$ при соответствующем значении эффективного радиуса пор r. После достижения критической высоты навала торфа обезвоживание прекращается и для дальнейшего удаления влаги требуется механическое отжатие сырья или сушка торфа (полевая сушка или в заводских условиях).

В результате ранее проведенных исследований [2, 3] показано, что экспериментальное значение $H_{кр.э}$ необходимо связать с теоретическим $H_{кр.т}$ через коэффициент β, учитывающий особенности реальной структуры и косвенно отражающий сопротивление переносу влаги,

$$H_{кр.э} = H_{кр.т}\beta. \qquad (1)$$

То же самое можно записать и для высоты навала торфа $h(h_э, h_т)$:

$$h_э, = h_т\beta, \qquad (2)$$

$$\beta = h_э/h_т = H_э/H_т.$$

Таким образом, формулу для расчета интенсивности гравитационного обезвоживания торфа можно записать в виде:

$$i_g = k_{эф}\frac{P_к - P_г}{H_{кр}}, \qquad (3)$$

где $k_{эф} = k_в\beta$ – эффективный коэффициент влагопереноса; $k_в$ – коэффициент влагопроводности. Уравнение (3) можно представить в виде [2, 3]:

$$i_g = -k_в\left(\frac{2\sigma\cos\Theta}{rh_i} - \rho_ж g\right), \qquad (4)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; r – радиус пор; Θ – угол смачивания

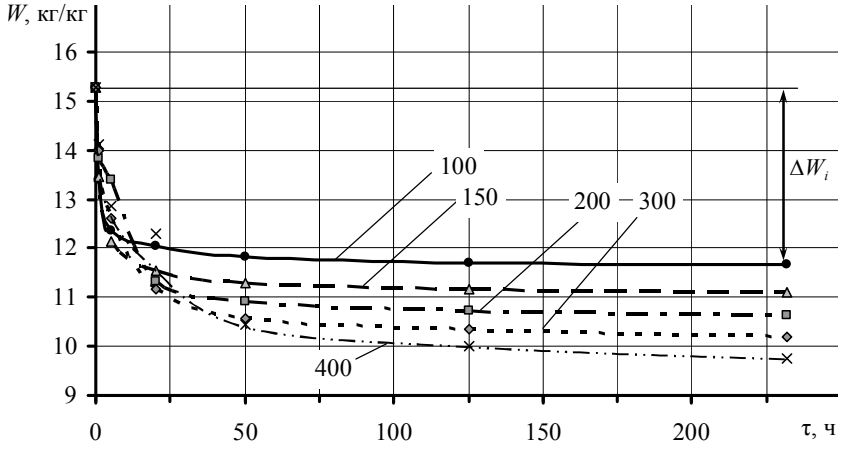


Рис.1. Зависимость влагосодержания W от времени τ гравитационного обезвоживания верхового шейхцериево-сфагнового торфяного сырья; степень разложения $R_т$ = 22-25 % при T = 293 К в слоях различной высоты $h_н = (100; 150; 200; 300; 400)\cdot 10^{-3}$ м; $\Delta W_i = W_н - W_{кр}$ при $h_н = 100\cdot 10^{-3}$

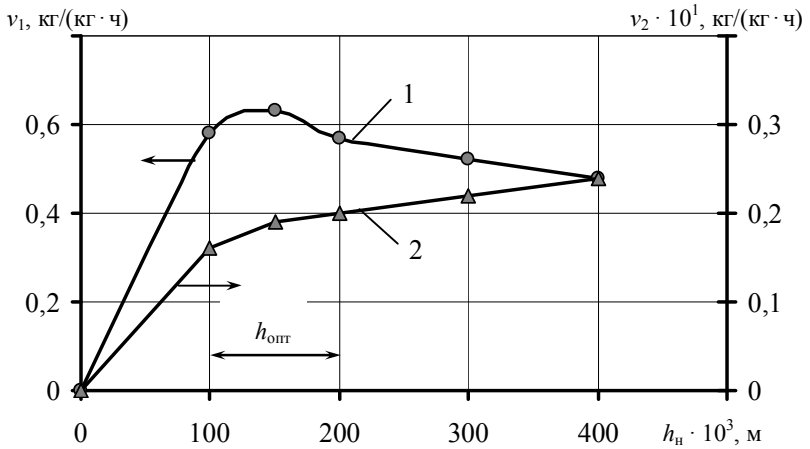


Рис.2. Изменение средней скорости обезвоживания v_1 от начальной высоты навала $h_н$ за первые 5 ч (кривая 1) и за 232 ч (кривая 2); $v_i = dW_i/d\tau_i$ (условия обезвоживания аналогичны рис.1)

твердой фазы жидкостью; g – ускорение свободного падения; $\rho_ж$ – плотность связанной жидкости, $\rho_ж = (0{,}81\text{-}1{,}32)\cdot 10^3$ кг/м^3 при $T = 273\text{-}311$ К. Причем с ростом влагосодержания W и уменьшением степени переработки (степени разложения $R_т$) плотность уменьшается для каждого периода структурообразования и в зависимости от температуры проходит через максимум [1].

В работах [2, 4] показана взаимосвязь коэффициента влагопроводности с фильтрационными свойствами торфа

$$k_{в2} = k_{в1}\exp\left[-\alpha_ф\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2\right)\right]^{\lambda_р i_l}, \qquad (5)$$

где $\alpha_ф$ – коэффициент, характеризующий уменьшение водопроницаемости торфа при его увлажнении [5]; ε_1, ε_2 – коэффициенты пористости, соответственно, начальные и текущие значения; $\varepsilon = n/(1-n)$; n – общая пористость; $\lambda_р = (\rho_ж k_ф)^{-1}$ – характеризует обратную величину интенсивности влагопереноса; $k_ф$ – максимальное значение коэффициента фильтрации.

Максимальный коэффициент влагопроводности для верхового типа торфа принимает наименьшие значения $k_{в2} = (0{,}002\text{-}0{,}073)\cdot 10^{-10}$ с по сравнению с переходным $k_{в2} = (0{,}006\text{-}0{,}426)\cdot 10^{-10}$ с и низинным $k_{в2} = (0{,}145\text{-}0{,}342)\cdot 10^{-10}$ с и линейно убывает с ростом степени разложения. Причем i_g для низинного и переходного торфа проходит через минимум при степени разложения $R_т = 31$ %. Зависимость $i_g = f(R_т)$ для торфа верхового типа характеризуется линейным уменьшением интенсивности с ростом $R_т$ [2].

При достижении фильтрационного равновесия, когда $i_g \to 0$, $P_к \to P_g$, $h_i = H_{кр}$, количество оставшейся влаги в навале торфа и $H_{кр}$ буду коррелировать с коэффициентом влагопроводности, пористости, размерами пор, высотой навала, т.е. для торфа верхового типа при $H_{кр} = \text{const}$ масса оставшейся влаги $H_{кр}W_{кр}$ в слое $H_{кр}$ будет выше, чем у переходного и низинного типов (рис.1, 2). Для одного типа торфа приведенное значение оставшейся влаги

$$M_п = H_{кр}W_{кр} \qquad (6)$$

растет с повышением высоты навала $h_н$ (табл.1).

Выражение (6) можно привести к общепринятому расчету массы воды $m_в$ через технологические характеристики $H_{кр}$, $\gamma_с$, V, $\rho_ж$. Для этого умножим и разделим уравнение (6) на плотность сухого вещества торфа $\gamma_с$:

$$M_п = H_{кр}W_{кр}\frac{\gamma_с}{\gamma_с}.$$

Произведение $W_{кр}\gamma_с = \rho_ж$ дает значение плотности связанной жидкости. Тогда выражение для приведенного значения оставшейся влаги можно записать как

$$M_п = \frac{H_{кр}}{\gamma_с}\rho_ж.$$

Заменяя $\rho_ж = m_в / V$ через массу воды и ее объем, получим

$$M_п = \frac{H_{кр}}{\gamma_с}\frac{m_в}{V},$$

$$m_в = M_п\frac{\gamma_с V}{H_{кр}}.$$

Масса воды, содержащейся в навале торфа, пропорциональна $M_п$, $\gamma_с$, V, $1/H_{кр}$. Если все величины, кроме $M_п$, считать постоянны-

Таблица 1

Изменение влагосодержания при гравитационном обезвоживании торфа в навалах различной высоты в зависимости от времени

$h_н\cdot 10^3$, м	$H_{кр}\cdot 10^3$, м	Время τ, ч							$K'_{эф}$	$K'_{эw}$	$H_{кр}W_{кр}$, м(кг/кг)
		0	1	5	20	50	125	232			
100	73	15,28	13,38	12,37	12,04	11,82	11,71	11,66	0,270	0,237	0,85
150	110	15,28	13,46	12,15	11,53	11,29	11,17	11,11	0,270	0,273	1,22
200	145	15,28	13,83	13,39	11,33	10,92	10,73	10,64	0,275	0,304	1,54
300	209	15,28	13,99	12,60	11,15	10,56	10,35	10,20	0,310	0,332	2,13
400	273	15,28	14,12	12,85	12,29	10,44	10,00	9,75	0,320	0,362	2,66

ми, $k_ж = \gamma_с V/H_{кр} = \text{const}$, то окончательно получим, что величина $m_в = k_ж M_п$ пропорциональна приведенной массе воды. В расчетах использование предложенного выражения удобнее, чем прямой расчет массы воды $m_в$. Если известна плотность жидкости $\rho_ж = \gamma_с W$ [1] и ее объем V, то уравнение можно заменить на довольно простое $m_в = \rho_ж V$, применение которого затруднительно из-за отсутствия справочных данных $\rho_ж$ и V для конкретного типа торфяного сырья.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях при конвективном теплообмене, температуре воздуха $T = 295$ К, относительной влажности воздуха $\varphi = 0{,}47$. При проведении лабораторных исследований применялся шейхцериево-сфагновый торф со степенью разложения $R_т = 22\text{-}25$ %, зольностью $A^c = 6{,}55$ %, содержанием серы 0,26 %, низшей теплотой сгорания на рабочее топливо $Q_р^н = 11{,}22$ МДж/кг при $w = 40$ % ($Q_р^н = 2685$ ккал/кг). Торф имеет довольно высокую теплоту сгорания и может быть использован для производства окускованного топлива. При проведении исследований начальное влагосодержание торфа $W_н = 15{,}28$ кг/кг ($w = 93{,}86$ %).

Торф нарушенной структуры закладывался в колонки различной высоты, круглого сечения с сетчатым дном. Высота колонок $h = 100$; 150; 200; 300; 400 мм. После заполнения колонок они ставились на фильтрацию. В процессе проведения эксперимента фиксировались технологические показатели: масса гравитационной воды (фильтрат), высота осадки слоя торфа в колонке $h_{ос}$ и критическая толщина слоя $H_{кр}$. С помощью специального датчика фиксировалось влагосодержание W торфа. Для контроля интенсивности обезвоживания торфа проводились измерения интенсивности испарения водной поверхности, которые позволили учесть долю испарившейся из торфа влаги в процессе его гравитационного обезвоживания.

Эффективность обезвоживания характеризуется отношением

$$K'_{эф} = \frac{h_н - H_{кр.э}}{h_н}, \qquad (7)$$

которая тем выше, чем меньше $H_{кр}$ при $h_н = \text{const}$. Эту величину можно рассчитать и через изменение влагосодержания

$$K'_{эw} = \frac{W_н - W_{кр}}{W_н} = 1 - \frac{W_{кр}}{W_н}, \qquad (8)$$

где $W_{кр}$ – принимается в условиях, когда $h_i = H_{кр}$, $i_g = 0$. В нашем случае такое приближение допустимо (табл.1) при $\tau = 232$ ч, когда $i_g \to 0$ (табл.2).

Таблица 2

Зависимость интенсивности гравитационного обезвоживания торфа от времени

$h_н \cdot 10^3$	Время τ, ч					
	0,5	4,5	21	49	109,5	225,5
100	12,99	0,76	0,12	0,06	0,003	0
150	18,39	1,57	0,25	0,05	0,002	0
200	19,51	2,69	0,35	0,15	0,003	0
300	26,14	4,48	0,90	0,18	–	0,005
400	31,35	5,58	1,46	0,44	0,069	0,015

В первом случае $K'_{эф} = 0{,}27\text{-}0{,}32$, во втором $K'_{эw} = 0{,}237\text{-}0{,}362$ (табл.3), т.е. значения мало отличаются, что свидетельствует о достоверности результатов проведенных исследований, так как средние величины коэффициентов $K'_э = 0{,}3$ совпали с расхождением, не превышающим 0,5 %.

Зависимость коэффициентов эффективности гравитационного обезвоживания обуславливается значениями высоты навала и влагосодержанием, которые при равных величинах $K'_{эф} = K'_{эw}$ могут быть заменены:

$$K'_{эw} = 1 - \frac{H_{кр.э}}{h_н} \quad \text{или} \quad K'_{эф} = 1 - \frac{W_{кр}}{W_н}.$$

С учетом полученных зависимостей (1) и $H_{кр.т} = \dfrac{2\sigma\cos\Theta}{r\rho_ж g}$ выражения (7) и (8) принимают вид:

$$K'_{эф} = 1 - \frac{\beta}{h_н}\frac{2\sigma\cos\Theta}{r\rho_ж g}, \qquad (9)$$

Таблица 3

Зависимость коэффициентов эффективности обезвоживания от высоты навала торфа

$h_н \cdot 10^3$, м	$H_{кр} \cdot 10^3$, м	$W_{кр}$, кг/кг	W, кг/кг	$H_{кр}/h_н$	$W_{кр}/h_н$	$K'_{эф}$	$K'_{эw}$
1	2	3	4	5	6	7	8
100	73	11,66	15,29	0,730	0,760	0,270	0,237
150	110	11,11	15,29	0,730	0,730	0,270	0,273
200	145	10,64	15,29	0,725	0,700	0,275	0,304
300	209	10,20	15,29	0,700	0,670	0,310	0,332
400	273	9,75	15,29	0,680	0,640	0,320	0,362

Примечания. 1. $\frac{H_{кр.э}}{h_н} + K'_{эw} = 1$; $\frac{W_{кр}}{W_н} + K'_{эф} = 1$. 2. Если сложить колонки 5 и 7, 6 и 8, то согласно формулам (7) и (8)получим значения, близкие к единице.

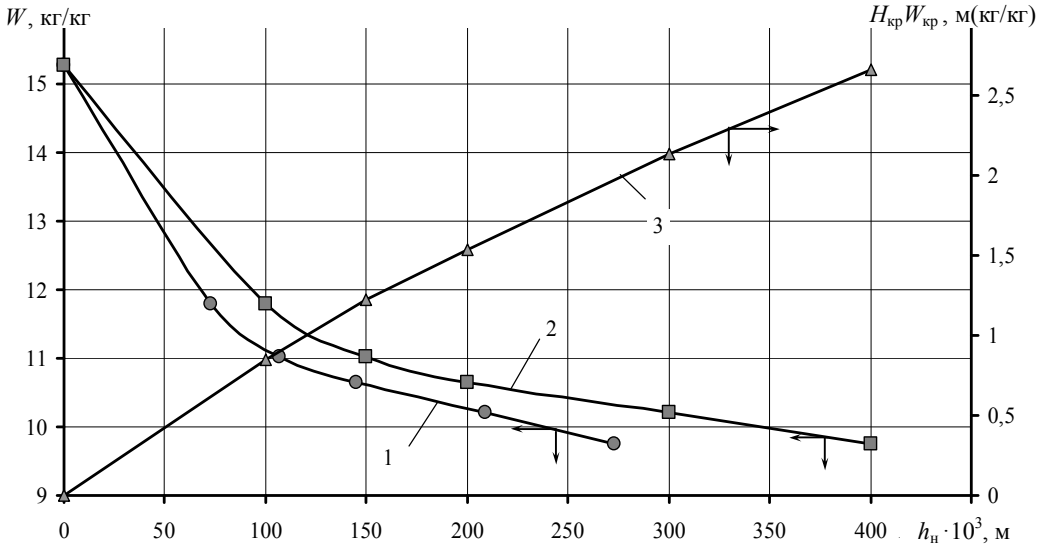


Рис.3. Зависимость влагосодержания W от критической толщины $H_{кр}$ навала торфа (1), его начальной высоты $h_н$ (2) и произведения $H_{кр}W_{кр}$ в функции $h_н$ (3); условия обезвоживания аналогичны рис.1; $W_н$ = 15,286 кг/кг

$$K'_{эw} = 1 - \frac{W_{кр}}{W_н}. \qquad (10)$$

Сравнивая уравнения (9) и (10), найдем, что перепад

$$\Delta W = W_н \frac{\beta}{h_н} \frac{2\sigma\cos\Theta}{r\rho_ж g}. \qquad (11)$$

Перепад влагосодержания $\Delta W = W_н - W_{кр}$ связан с характеристиками структуры торфяной залежи r, β, воды δ, $\rho_ж$, Θ, высотой навала $h_н$, начальным влагосодержанием $W_н$, определяющими коэффициент эффективности торфа. Причем, чем меньше ΔW, тем выше значения $K'_{эw}$. Следовательно, при прочих равных условиях $K'_{эw}$ растет с повышением $h_н$, r и уменьшением β. Это обстоятельство подтверждается результатами экспериментальных исследований зависимости влагосодержания W от времени (см. рис.1) при различной высоте навала $h_н(W = f(\tau)$, $h_н$ = var, скорости обезвоживания v_1 в функции $h_н$ за $\tau = 5$ ч и $\tau = 232$ ч (рис.2, $v_1 = f(\tau)$, $W = f(H_{кр}, h_н)$ и приведенного количества оставшейся влаги $H_{кр}W_{кр} = M_п$ после осадки слоя торфа при $h_i = H_{кр}$ в зависимости от высоты навала $h_н$ (рис.3), интенсивности гравитационного обезвоживания i_g от времени $\tau(W = f(\tau)$ (табл.2), а также зависимости $H_{кр} = f(\tau)$. Зависимость $W = f(\tau)$ показательна тем, что в начальный период времени $\tau = 5$ ч скорость влагопереноса v_1 принимает максимальное значение при $h_н$ = 0,1-0,2 м (см. рис.1, 2). Наименьшее

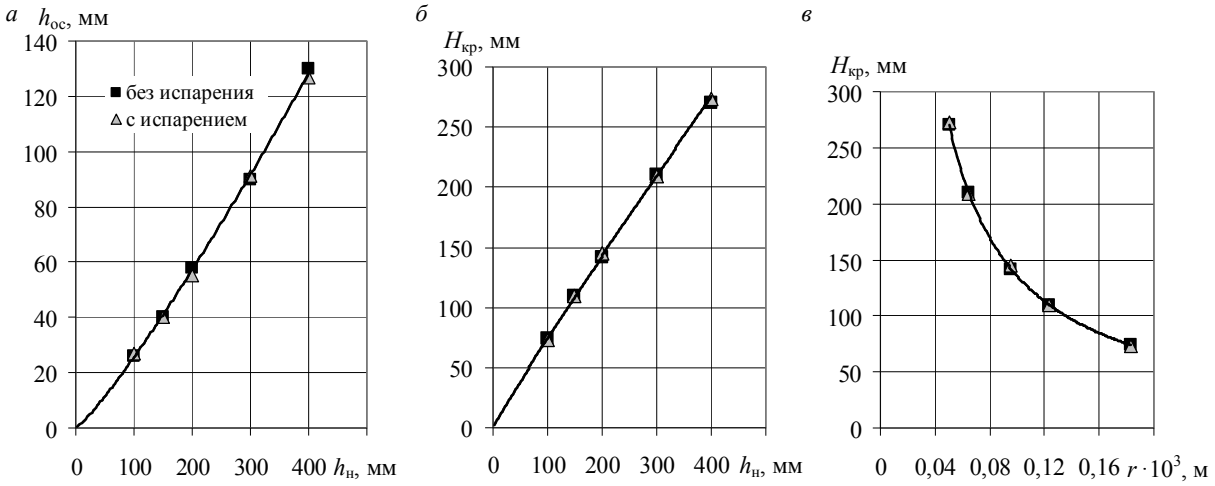


Рис.4. Зависимость осадки $h_{ос}$ (*а*) и критической толщины $H_{кр}$ (*б*) от начальной высоты слоя обезвоживания $h_н$; изменение $H_{кр}$ (*в*) в функции радиуса пор r без испарения и с его учетом для верхового шейхцериево-сфагнового торфа; $R_т$ = 22-25 %, T = 293 К, φ = 0,47

значение для W наблюдается для относительно толстых слоев (см. рис.1, 3, 4). Произведение $H_{кр}W_{кр}$ принимает большее значение для толстых слоев (см.табл.1) из-за увеличения $H_{кр}$ с ростом $h_н$.

Следовательно, коэффициент эффективности позволяет оценить количество потерянной влаги, т.е. определяет влагопроводные свойства торфяного сырья (табл.3), а произведение $H_{кр}W_{кр}$ характеризует количество оставшейся внутри влаги. При $K'_{эф} \to 1$, $\Delta W \to 0$ и $H_{кр}W_{кр} \to 0$ количество оставшейся в торфяном сырье влаги определяет комплекс последующих технологических операций по снижению ее количества другими способами (механическое отжатие, полевая или заводская сушка и др.), а коэффициент $K'_{эф}$ позволяет рекомендовать способы интенсификации гравитационного обезвоживания. Оптимальными следует считать следующие условия: $K'_{эф} \to 1$, $H_{кр} \to \min$, $H_{кр}W_{кр} \to \min$, $i_g \to \min$, $\Delta W \to 0$.

Таким образом, гравитационное обезвоживание позволяет удалить около 30 % влаги для верхового типа торфяной залежи нарушенной структуры. Для переходного и низинного типов торфа это значение должно быть выше из-за их более высокой влагопроводности.

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.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьев А.Е.* Влияние структурообразования на плотность жидкости коллоидных капиллярно – пористых тел / А.Е.Афанасьев, А.С.Ефремов // ТОХТ. 2011. Т.46. № 1.

2. *Афанасьев А.Е.* Теоретическая оценка коэффициентов влагопроводности торфяной залежи нарушенной структуры / А.Е.Афанасьев, Э.А.Кремчеев, А.С.Ефремов // ГИАБ, приложение «Гидромеханизация». 2012. Вып.6.

3. *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.

4. *Кремчеев Э.А.* Оценка эффективности гравитационного обезвоживания сырья при комплексной механизации круглогодовой добычи торфа / Э.А.Кремчеев, А.Е.Афанасьев // ГИАБ, 2012. № 4.

5. Технический анализ торфа / Е.Т.Базин, В.Д.Копенкин, В.И.Косов и др. М., 1992.

REFERENCES

1. *Afanasiev E.A.* The influence of structure on the density of the liquid colloidal capillary-porous bodies / A.E.Afanasiev, A.S.Efremov // TOHTI, 2011. Vol.46. N 1.

2. *Afanasiev E.A.* Theoretical estimation of the coefficients of hydraulic conductivity of peat deposits impaired structure / A.E.Afanasev, E.A.Kremcheev, A.S.Efremov // GIAB, topical application «Hydromechanization». 2012. Iss.6.

3. *Bazin E.T.* The impact of technological and physical-chemical effects on per meable-bridge structure and peat / E.T.Bazin, V.I.Kosov, S.V.Minyaev // Peat industry, 1981. N 7.

4. *Kremcheev E.A.* Evaluating the effectiveness of gravity drainage materials for year-round comprehensive mechanization of peat / E.A.Kremcheev, A.E.Afanasev // GIAB, 2012. N 4.

5. Technical analysis of peat / E.T.Bazin, V.D.Kopenkin, V.I.Kosov. Moscow, 1992.