

УДК 662.641.047:552.577:542.67

**Э.А. Кремчев, А.Е. Афанасьев, А.С. Ефремов**  
**ГРАВИТАЦИОННОЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЕ**  
**НАВАЛА ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ С УЧЕТОМ**  
**ИСПАРЕНИЯ ВЛАГИ\***

*Произведена оценка гравитационного обезвоживания навала торфа повышенного влагосодержания с учетом испарения влаги с его поверхности при конвективном и радиационно-конвективном теплоподводе в зависимости от высоты навала торфа и условий теплоподвода. Установлено время, при котором интенсивности этих потоков выравниваются.*

*Ключевые слова: торф, сырье, фильтрация, структура, испарение, равновесие.*

**Т**еоретические предпосылки:

В работах [1, 2] было приведено теоретическое обоснование и результаты экспериментальных исследований подтверждающие, что влагопроводность торфяной залежи нарушенной структуры и предельной высоты навала сырья  $H_{кр}$  под действием капиллярно-осмотических и гравитационных сил зависит от степени разложения торфа, пористости, интенсивности потока влаги, причем последний можно определить через коэффициент фильтрации с использованием модельных представлений о пористой структуре торфа  $r_i$  по известным, ранее теоретически установленным значениям. Для этой цели вводится понятие сопротивления переносу влаги в реальных средах по сравнению с модельными структурами и используется коэффициент сопротивления  $\beta$ , показывающий изменение приращения  $k_{ri} = dH_{кр} / d(1/r_i)$  для экспериментальных и теоретических исследований, т.е.

$$\beta = \frac{k_{r\Delta}}{k_{rT}}, \quad (1)$$

где  $k_{r\Delta}$  и  $k_{rT}$  — соответствующие угловые коэффициенты зависимостей  $H_{кр\Delta} = f(1/r_i)$  и  $H_{крT} = f(1/r_i)$ . Для шейхспериево-сфагнового торфа степенью разложения  $R_T = (22 - 25)\%$   $\beta = 1,016 \cdot 10^{-4}$ . Значения радиусов пор вычислялись из условия равенства капиллярного

$$P_k = \frac{2\sigma \cos \Theta}{r}, \quad (2)$$

\*Научно-исследовательская работа выполняется в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.

и гравитационного давления

$$P_g = \rho_{ж} g h_i, \quad (3)$$

снижающих интенсивность потока влаги  $i_g$  до нуля,

$$i_g = -k_b \frac{P_k - P_g}{h_i} = -k_b \left( \frac{2\sigma \cos \Theta}{r h_i} - \rho_{ж} g \right), \quad (4)$$

где  $\Theta$  — угол смачивания твердой фазы жидкостью;  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости;  $h$  — высота слоя. Высота слоя связана с радиусом пор  $r$  следующим соотношением:

$$h = H_{кр} = \frac{2\sigma \cos \Theta}{r \rho_{ж} g}. \quad (5)$$

Рассматриваемое фильтрационное равновесие ( $P_k = P_g$ ,  $i_g = 0$ ) будет нарушаться в результате испарения влаги с поверхности навала торфяного сырья, т.е. при

$$P_k \leq P_g, \quad i = (i_g + i_u) > 0, \quad (6)$$

где  $i_u$  — интенсивность испарения влаги при  $h_i \geq H_{кр}$ . В этом случае дополнительная потеря влаги будет осуществляться за счет ее испарения с поверхности образовавшихся пленок, менисков крупных и узких пор, а также вследствие капиллярной подпитки влаги в зону испарения. При мало изменяющихся температурно-влажностных условиях парогазовой среды можно не учитывать интенсивность теплопотока влаги,

$$i_t = -\delta a_m \gamma_c \frac{dT}{dx}, \quad (7)$$

где  $\delta$  — термоградиентный коэффициент;  $\gamma_c$  — плотность сухого вещества торфа,  $a_m$  — коэффициент диффузии влаги;  $(dT/dx)$  — градиент температуры. При этом использование уравнения интенсивности влагопереноса

$$i = -a_{ж} \gamma_c \frac{dW}{dx}, \quad (8)$$

определяющего подпитку влаги в зону испарения, затруднительно из-за того, что градиент влагосодержания  $dW/dx$  изменяется не только за счет испарения, но и в результате фильтрации влаги при  $h_i > H_{кр}$ . Данный недостаток исключается при  $h_i \leq H_{кр}$ , т.е. при отсутствии гравитационного обезвоживания. Поэтому, долю испарившейся влаги в первом случае ( $h_i > H_{кр}$ ) можно учесть только через характеристики внешнего массообмена:

$$i_u = \alpha_m (P_M - P_c) \quad (9)$$

или теплообмена,

$$q_k = \alpha_q (t_c - t_{пов}), \quad (10)$$

где  $(\alpha_m, \alpha_q)$  — коэффициенты внешнего массообмена ( $кг/м^2 \cdot ч \cdot Па$ ) и теплообмена соответственно ( $Вт/м^2 K$ );  $(P_M, P_c)$  — соответствующие парциальные давления ( $Па$ ) у поверхности испарения и в окружающей среде. Причем, в нашем случае удобнее использовать уравнение (10), выразив его через удельную теплоту парообразования  $R_n$  [3],

$$R_n = 2501 - 2,72t, \quad (11)$$

и интенсивность испарения

$$q_k = R_n \cdot i_n, \quad (12)$$

где  $t$  — температура в  $^{\circ}C$ , 2501 — удельная теплота парообразования при  $t = 0^{\circ}C$  ( $кДж/кг$ ). Подставим уравнение (11) в (12), а последнее в (10) и окончательно получим, что

$$i_n = \frac{\alpha_q (t_c - t_n)}{R_n} \quad (13)$$

зависит от  $\alpha_q$  и разности  $\Delta t = t_c - t_n$  температур при конвективном теплоподводе.

В случае радиационно-конвективного теплоподвода в формулу (13) необходимо ввести лучистую составляющую теплового потока  $q_n$ , которую можно выразить через радиационный баланс  $B$  за вычетом потерь  $\Delta$  теплоты через основание навала, особенно для малых по высоте образцов,

$$q_n = \frac{B(100 - \Delta)}{100}. \quad (14)$$

Таким образом, уравнение (13) принимает вид:

$$i_n = \frac{q_n + \alpha_q (t_c - t_n)}{R_n}, \quad (15)$$

которое при малых потерях энергии ( $\Delta \rightarrow 0$ ) будет

$$i_n = \frac{B + \alpha_q (t_c - t_n)}{R_n} = \frac{B + q_k}{R_n} = \frac{q_0}{R_n}, \quad (16)$$

где  $q_0 = B + q_k$  — суммарный тепловой поток.

Таким образом, при определении суммарного потока влаги из навала торфяного сырья будут складываться гравитационный поток  $i_q$  (уравнение (4)) и испаряемость  $i_n$  (формулы (15), (16)) для  $h_i \geq H_{кр}$ ,

$$i = i_g + i_{и} = -k_B \left( \frac{2\sigma \cos \Theta}{r_i h_i} - \rho_{ж} g \right) + \frac{q_n + \alpha_q (t_c - t_n)}{R_n}. \quad (17)$$

Для реальных сред вводится уравнение (1), через которое записывается коэффициент  $K'_{эф} = k_B \beta$ , отражающий эффективность влагопроводности (эффективный коэффициент влагопереноса). Тогда уравнение (17) принимает следующий вид:

$$i_{и} = -K'_{эф} \left( \frac{P_k - P_g}{h_i} \right) + \frac{B + \alpha_q (t_c - t_n)}{R_n}. \quad (18)$$

То есть, при  $P_k < P_g$ ,  $h_i > H_{кр}$  величина  $i_{и}$  обратна высоте навала  $h_i$  и радиусу пор  $r$ , пропорциональна тепловому потоку  $q_0$  и перепаду давлений  $\Delta P = (P_g - P_k)$ .

Для второго случая, когда  $h_i \leq H_{кр}$  исключается гравитационный поток ( $i_g = 0$ ) и градиент влагосодержания в формуле (8) меняется только за счет испарения влаги. В этой связи, из условия сохранения массы вещества, можно получить, что количество жидкости, подведенное в зону испарения  $i$  (формула (8)) равно количеству испарившейся влаги (формула (16)),

$$\frac{B + \alpha_q (t_c - t_n)}{R_n} = -a_m \gamma_c \frac{dW}{dx}, \quad (19)$$

позволяющих определять некоторые коэффициенты ( $\alpha_q$ ,  $a_m$ ) и градиент влагопереноса  $dW/dx$ .

В порядке упрощения расчетов можно воспользоваться формулой профессора А.Е.Афанасьева [4], которую представим в виде:

$$i_c = \gamma_c \cdot \Delta W \cdot C \sqrt{\frac{D}{2\tau}}, \quad (20)$$

где  $\Delta W = W_n - W_k$  — интервал влагосодержания;  $C = m \sqrt{v_m P_s \Delta \varphi \alpha / (R T)} = const$ , характеризует особенности влагопереноса в реальной пористой среде (безразмерная величина) в связи с изменением активной пористости  $m$ ,  $\Delta \varphi = 1 - \varphi_c$ , температуры  $T$ , давления насыщенных паров  $P_s$ , ослабления диффузии паров воды  $\alpha$ , молекулярного объема  $v_m$  и универсальной газовой постоянной  $R$ . Причем значения величины  $B = m \sqrt{\alpha}$  меняется в пределах 0,19...0,33 (верховой торф) и 0,19...0,42 (низинный торф), что близко к средним значениям данной величины характерным для почв,  $B = 0,25$  [5];  $D$  — коэффициент диффузии пара через газ, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  — время, с.

Исследования с радиоактивными метками показали [6], что сушка происходит в зоне испарения  $h_{зи}$  [7] толщиной  $h_{зи} = 20...40$  мм,

$$h_{зи} = H_{кр} \sqrt{\frac{1}{1+W}}, \quad (21)$$

которая возрастает с уменьшением влагосодержания  $W$  (полевые условия сушки) и в пределе приближается к толщине навала торфа  $H_{кр}$ .

Таким образом, сложностью в расчетах необходимо считать предварительную оценку коэффициентов теплообмена  $\alpha_q$ , радиационного баланса  $B$  поверхности навала торфа при  $h_i > H_{кр}$  и коэффициентов диффузии  $a_m$  влаги при  $h_i \leq H_{кр}$ .

Так, для первого случая ( $h_i > H_{кр}$ ) при конвективном теплообмене коэффициент  $\alpha_q$  можно рассчитать через критерий Нуссельта,

$$\alpha_q = N_{уг} \frac{\lambda}{l}, \quad (22)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха [7],

$$\lambda = \lambda_q + 0,048\varphi_c, \quad (23)$$

здесь  $\lambda_q$  — коэффициент теплопроводности сухого воздуха,  $\varphi_c$  — относительная влажность воздуха (доли единицы),  $l$  — размер образца в направлении движения воздуха. В этом случае для  $t_c = 5...40^\circ C$ ,  $\varphi = 10...98\%$ , скорости ветра  $v = 0,5...6,0$  м/с, критерий  $N_{уг}$  вычисляется из уравнения [9]

$$N_{уг} = 15,8 \cdot 10^{-3} \cdot R_e^{0,8} \left( \frac{T_m}{T_c - T_0} \right)^{0,44}, \quad (24)$$

где  $R_e$  — число Рейнольдса;  $T_m$ ,  $T_c$  — температура мокрого и сухого термометров соответственно;  $T_0 = 273$  К.

Во втором случае, когда  $h_i \leq H_{кр}$  коэффициент  $a_m$  вычисляется из уравнения (19), при  $B = 0$ ,

$$a_m = \frac{\alpha_q (t_c - t_n) dx}{R_n \gamma_c dW}. \quad (25)$$

При радиационно-конвективном теплоподводе используется то же уравнение (19) с учетом  $B$ .

Особенностью использования формулы (25) является определение градиента влагосодержания. Поэтому можно воспользоваться другим подходом [7], когда рассчитывается эффективный коэффициент диффузии

$$a_m = \frac{i_c P_c}{6\gamma_c^2 \Delta W} = \frac{i_c h}{6\gamma_c \Delta W}, \quad (26)$$

где  $P_c$  — загрузка торфа по сухому веществу торфа, кг(с)/м<sup>2</sup>;  $P_c = (m_c/F) = \gamma_c h$ ,  $m_c$  — масса сухого вещества торфа,  $m_c = \text{const}$ ;  $F$  — площадь поверхности, на которой находится торф,  $\Delta W = W_H - \langle W_i \rangle$  — разность влагосодержаний между начальным  $W_H$  и средним (текущим)  $\langle W_i \rangle$  влагосодержанием.

#### **Экспериментальные исследования:**

Использовался верховой шейхцериево-сфагновый торф  $R_T = (22...25)\%$  [1]. Исследования велись в комнатных условиях (конвективный теплоподвод) при  $t_c \approx 21,8^\circ\text{C}$ ,  $t_m \approx 15,2^\circ\text{C}$ ,  $\phi = 47\%$ ,  $q_n = 0$ , скорость обдува  $v \leq 2$  м/с,  $W_H = 16,432$  кг/кг. Определив величину  $i_n$  из эксперимента (по испарению воды с модели влажного торфа, свободной воды) можно по формуле (13) найти коэффициент теплообмена  $\alpha_q$ , Вт/м<sup>2</sup>К, для разных условий испарения.

Второй подход в определении  $\alpha_q$  сводится к теоретическому расчету коэффициента по формуле (22) с учетом (23) и (24). Характерная длина сосуда (испарителя)  $l = 0,220$  м,  $v = 15,26 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с, а также теплофизические характеристики принимаются из [8]. При этом критерий Рейнольдса вычисляется из формулы:

$$R_e = \frac{v \cdot l}{\gamma}, \quad (27)$$

где  $\gamma$  — кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с. Воспользуемся вторым подходом, позволяющим рассчитать величину испаряемости  $i_n$ .

#### **Конвективный теплоподвод, $h_i > H_{кр}$ :**

1. Критерий Рейнольдса (27),

$$R_e = \frac{2 \cdot 0,220}{15,26 \cdot 10^{-6}} = 2,88 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}.$$

2. Коэффициент теплопроводности воздуха (23),

$$\lambda = 2,61 \cdot 10^{-2} + 0,0048 \cdot 0,47 = 2,83 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

3. Температура поверхности  $t_n$  принималась равной температуре мокрого термометра,  $t_n = t_m = 15,2^\circ\text{C}$ .

4. Критерий Нуссельта рассчитывался по формуле (24),

$$N_{ug} = 15,8 \cdot 10^{-3} \cdot (2,88 \cdot 10^4)^{0,8} \left( \frac{288,35}{294,95 - 273,15} \right)^{0,44} = 181,82$$

5. Коэффициент конвективного теплообмена (22),

$$\alpha_q = 181,82 \frac{0,0283}{0,220} = 23,388 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

6. Конвективная составляющая теплового потока  $q_k$  определяет величину испаряемости (13):

$$q_k = \alpha_q (t_c - t_m).$$

Окончательно получим, что

$$i_u = \frac{\alpha_g(t_c - t_m)}{R_{\Gamma}} = \frac{23,388(21,8-15,2)}{2501 - 2,72 \cdot 15,2} = 62,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}} = 0,225 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{ч}}.$$

Сравнение гравитационного обезвоживания  $i_g$  с испарением  $i_u$  влаги с поверхности навала производится на основе функциональной зависимости  $i_g = f(\tau)$  при различных значениях высоты  $h_n$  навала торфа.

Как показали впервые выполненные исследования, зависимость  $i_g = f(\tau)$  имеет падающий (гиперболический вид) (рис. 1) при различных  $h_n$ . Построим в этих же координатах зависимость  $i_u = f(\tau)$  и в точке пересечения графиков  $i_g$  и  $i_u$  найдем время  $\tau_p$ , при котором  $i_g = i_u$ . Эта временная граница и определяет условие, при котором необходимо учитывать  $i_u$  ( $\tau > \tau_p$ ).

Так, например, для  $h_n = 100 \cdot 10^{-3}$  м,  $i_u = 0,225$  кг/(м<sup>2</sup>ч),  $i_g = 12,99$  кг/(м<sup>2</sup>ч),  $\tau = 0,5$  ч, относительная погрешность  $\Delta = (i_u \cdot 100\%) / i_g = 1,7\%$ , которая убывает с ростом  $h_n$  (рис. 1). С ростом  $\tau$   $i_g \rightarrow i_u$ . При условии  $i_g = i_u$ ,  $\tau = \tau_p$ . Величина  $\tau_p$  растет с повышением высоты навала  $h_n$  торфяного сырья нарушенной структуры. Величина  $\tau_p$  описывается линейной зависимостью (рис. 2),

$$\tau_p = k_h \cdot h_n, \quad (28)$$

с угловым коэффициентом  $k_{h1} = d\tau_p / dh_n$ , ч/м, значение которого составляет  $k_{h1} = 0,15 \cdot 10^3$  ч/м.

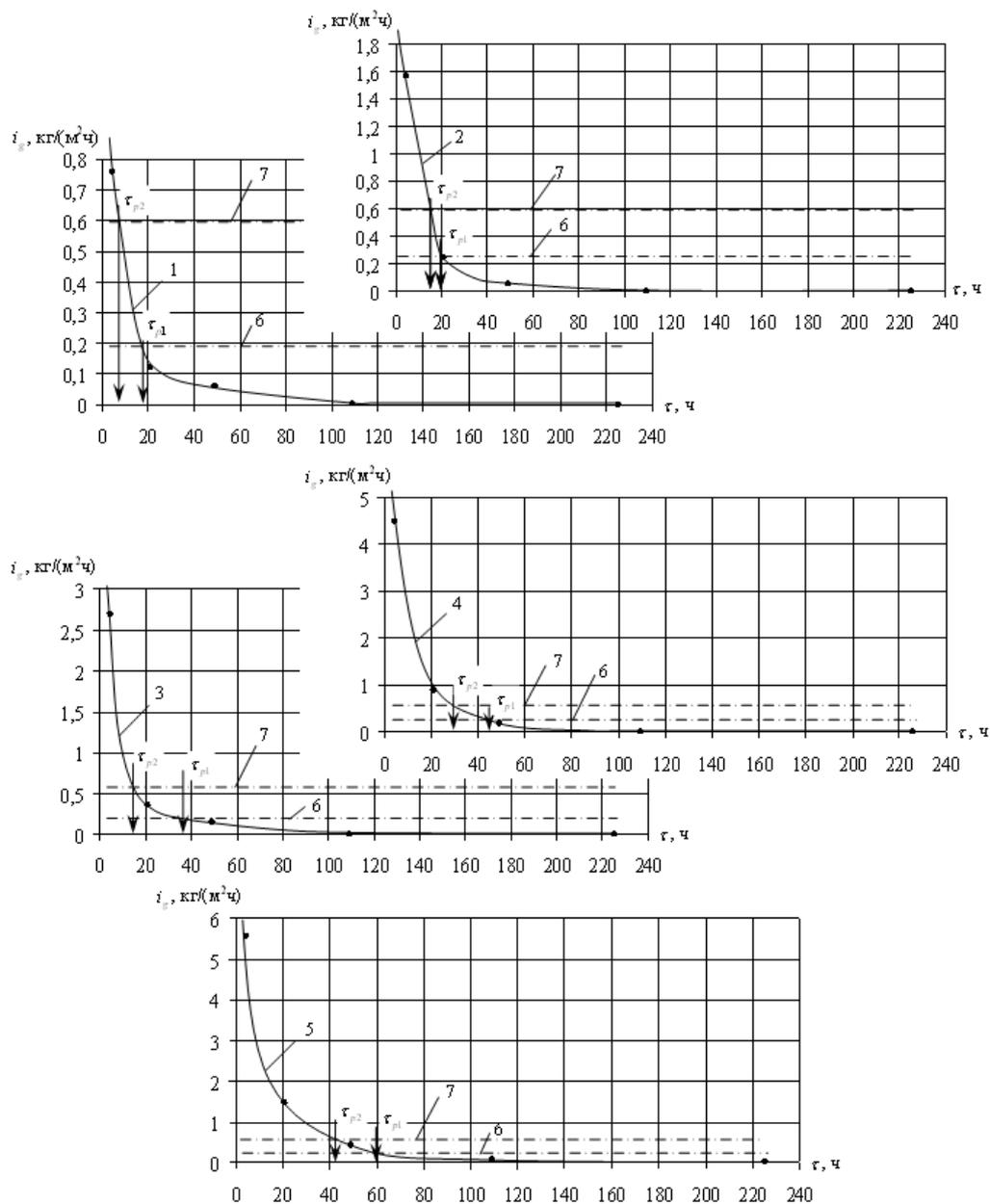
Если при  $h_n = h_i$ , из формулы (4) выразить  $h_i$ , подставить в формулу (28) с учетом (1), то получим зависимость:

$$\tau_p = -K'_{эф} k_h \frac{P_k - P_g}{i_g}, \quad (29)$$

которая показывает, что  $\tau_p$  растет с повышением комплекса  $(-(P_k - P_g) / i_g)$ , т.е. с уменьшением  $i_g$  для различных  $h_n$  (рис. 1), и при  $P_k \Rightarrow P_g$  ( $h_i \Rightarrow H_{кр}$ )  $\tau_p \rightarrow 0$ .

Следовательно, при  $\tau < \tau_p$  преобладает обезвоживание навала торфа за счет фильтрации и незначительного испарения. Поэтому при конвективном теплоподводе его можно не учитывать.

В случае радиационно-конвективного теплоподвода  $\tau_p$  уменьшается из-за роста  $i$  (формула (17)) согласно уравнению (29) (при  $i_g = i_u$ ). Причем перерасчет  $\tau_i$  при различных  $h_i$  определяется из соотношения:  $h_2 = h_1 \frac{\tau_2}{\tau_1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .



**Рис. 1.** Зависимость  $i_g = f(\tau)$  для  $h_n = 100 \text{ мм}$  (1),  $150 \text{ мм}$  (2),  $200 \text{ мм}$  (3),  $300 \text{ мм}$  (4),  $400 \text{ мм}$  (5) в сравнении с интенсивностью испарения  $i_u$  (6) ( $i_u = 0,225 \text{ кг/(м}^2\text{ч)}$ ),  $\tau_p$  - время, при котором  $i_g = i_u$  для шейхцериево-сфагнового торфа  $R_T = (22...25)\%$ , конвективный теплоподвод — 6, радиационно-конвективный теплоподвод — 7

Таблица 1

**Сравнение гравитационного обезвоживания с испарением влаги с поверхности навала торфа при различном теплоподводе (К и РК — режимы,  $i_g = i_u$ )**

Высота навала, $h_n \cdot 10^3$ , м	Время $\tau$ , ч						Равновесное время $\tau_p$ , ч	
	0,5	4,5	21	49	109,5	225,5	К-режим	РК-режим
	Интенсивность обезвоживания $i_g$ , кг/(м <sup>2</sup> ч)							
100	12,99	0,76	0,12	0,06	0,003	0	18,0	8,0
150	18,39	1,57	0,25	0,05	0,002	0	20,0	15,5
200	19,51	2,69	0,35	0,15	0,003	0	37,0	15,0
300	26,14	4,48	0,90	0,18	-	0,005	45,0	30,0
400	31,35	5,58	1,46	0,44	0,069	0,015	60,0	43,0

*Примечание.* 1. К и РК — соответственно конвективный и радиационно-конвективный теплоподвод.  
2. Значения  $\tau_p$  получены по данным (рис. 1) экстраполяцией пересечения графиков  $i_g = f(\tau)$  и  $i_u = f(\tau)$  по оси  $\tau$ .

Оценка движения влаги при радиационно-конвективном теплоподводе,  $h_i > H_{кр}$  осуществляется по той-же схеме с использованием расчетной формулы (16). В качестве примера принимаем величину  $q_n = B$  по средним данным летних месяцев (июнь-август 13—14 ч, 1991 г. [6], Тверская область, Осташковский район) сезона добычи торфа,  $q_n = 0,38$  кВт/м<sup>2</sup>,  $t_c \approx 21,8$  °C,  $t_m \approx 15,2$  °C,  $\Delta t = 6,6$  °C,  $v \leq 2$  м/с. Шейхериево-сфагновый торф, размер сосуда  $l = 0,220$  м,  $\nu = 15,26 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

1. Критерий Рейнольдса (26),  $Re = 2,88 \cdot 10^4$  м<sup>2</sup>/с.

2. Коэффициент теплопроводности воздуха (23),  $\lambda = 2,83 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·K).

3. Температура поверхности  $t_n$  рассчитывалась по формуле [8],

$$t_n = t_m + 0,22 \frac{q_n l}{\lambda} Re^{-0,6} \left( \frac{T_m}{T_c - T_0} \right)^{0,56},$$

$$t_n = 15,2 + 0,22 \frac{380 \cdot 0,220}{2,83 \cdot 10^{-2}} (2,88 \cdot 10^4)^{-0,6} \left( \frac{288,35}{294,95 - 273,15} \right)^{0,56} =$$

$$= 15,2 + 5,8 = 21$$
 °C.

4. Критерий Нуссельта рассчитывался по формуле,  $N_{ug} = 181,82$ .

5. Коэффициент конвективного теплообмена,  $\alpha_q = 23,388$  Вт/(м<sup>2</sup>·K).

6. Конвективная составляющая теплового потока  $q_k$ ,

$$q_k = \alpha_q (t_c - t_m) = 23,388 (21,8 - 21,0) = 18,7$$
 Вт/м<sup>2</sup>.

7. Суммарный тепловой поток,  
 $q_0 = q_k + q_n = 18,7 + 380 = 398,7 \text{ Вт/м}^2$ .

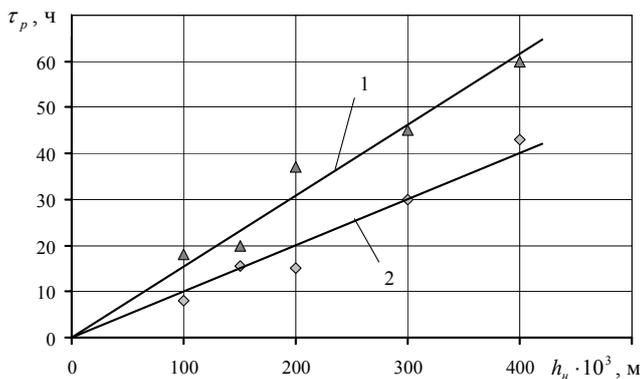
8. Испаряемость (16)

$$i_u = \frac{q_0}{R_n} = \frac{q_0}{2501 - 2,72t_n}, \quad (30)$$

$$i_u = \frac{398,7}{2501 - 2,72 \cdot 21} = 163,4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 0,588 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

Анализ полученных значений  $i_u$  показывает отличие радиационно-конвективного теплоподвода от конвективного в 2,61 раза, а значит и возрастает его роль при гравитационном обезвоживании торфяного сырья, т.е.  $\tau_{p2}$  уменьшается по сравнению с  $\tau_{p1}$ . Это обстоятельство вызывает уменьшение углового коэффициента ( $k_{h2} = 0,1 \cdot 10^3 \text{ ч/м}$ ) теоретической зависимости (29) при анализе данных (рис. 1 и рис. 2).

Подробный анализ таблицы также подтверждает графические зависимости с позиции необходимости учета испарения с поверхности навала тем раньше, чем меньше его высота  $h_n$  и выше тепловой поток при  $h_i > H_{кр}$ . При  $\tau = \tau_p$  величина интенсивности испарения  $i_u$  равна интенсивности гравитационного обезвоживания  $i_g$ , но при очень малых значениях  $i_u$ , вклад которых в общий поток влаги при разных  $h_n$  невелик, его можно не учитывать при  $\tau < \tau_p$ . При малых интенсивностях обезвоживания вклад  $i_u$  растет и его учет обязателен



**Рис. 2. Зависимость равновесного времени (при  $i_g$  и  $i_u$ ) обезвоживания шейхцернево-сфагнового торфа  $R_T = (22...25)\%$  от начальной толщины навала (конвективный теплоподвод — 1, радиационно-конвективный теплоподвод — 2)  $\tau_{pi} = k_{hi} \cdot h_n$ ,  $k_{h1} = 0,15 \cdot 10^3 \text{ ч/м}$ ,  $k_{h2} = 0,1 \cdot 10^3 \text{ ч/м}$**

при  $\tau > \tau_p$ , т.е. когда  $h_n \rightarrow H_{кр}$ . При  $h_n = H_{кр}$  роль  $i_g$  из общего баланса влаги  $i = i_g + i_u$  исключается ( $i_g = 0$ ,  $P_k = P_g$ ) и  $i = i_u$ .

Таким образом, гравитационное обезвоживание навала торфа является определяющим до  $h_i > H_{кр}$  по сравнению с испарением влаги с поверхности навала, увеличивающегося с ростом температуры, радиационного баланса ( $q_n = B$ ), уменьшением относительной влаж-

ности воздуха  $\varphi_c$ . Полагаем, что границей учета испарения служит время «равновесия»  $\tau_p$  при  $i_g = i_u$ , т.е. когда на испарение приходится 50 % потока  $i$  влаги. Величина  $\tau_p$  зависит от эффективного коэффициента влагопроводности  $k'_{эф}$ , высоты навала, перепада давлений  $P_k - P_g$ , приведенного к интенсивности гравитационного  $i_g$  обезвоживания. Следовательно, помимо полученных ранее [1,2] технологических характеристик, коэффициента сопротивления переносу влаги  $\beta$ , критической высоты  $H_{кр}$  навала торфа и степени разложения  $R_T=30-32\%$ , необходимо ввести время равновесного состояния по доле переносимой влаги за счет гравитации и испарения.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кремчев Е.А.* Оценка эффективности гравитационного обезвоживания сырья при комплексной механизации круглогодичной добычи торфа / Э.А. Кремчев, А.Е. Афанасьев // ГИАБ, 2012. — №4. — С. 50—58.
2. *Афанасьев А.Е.* Теоретическая оценка коэффициентов влагопроводности торфяной залежи нарушенной структуры / А.Е. Афанасьев, Э.А. Кремчев, А.С. Ефремов // ГИАБ, тематическое приложение «Гидромеханализация», 2012. Выпуск 6.
3. *Афанасьев А.Е.* Процессы сушки дисперсных материалов: учебное пособие / А.Е. Афанасьев, А.Н. Болтушкин. Тверь: ТГТУ, 2011. — 152 с.
4. *Афанасьев А.Е.* Интенсивность и продолжительность сушки крошкообразного торфа // Торф и бизнес, №3(13), 2008. — С. 31-35.
5. *Чудновский А.Ф.* Теплофизика почв / А.Ф. Чудновский. М: Наука, 1976. 353 с.
6. *Афанасьев А.Е., Чураев Н.В.* Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. М.: Недра, 1992. — 288 с.
7. *Афанасьев А.Е.* Физические процессы торфяного производства: учебное пособие. Тверь: ТГТУ, 2005. 208 с.
8. *Антонов В.Я., Малков Л.М., Гамаюнов Н.И.* Технология полевой сушки торфа. М.: Недра, 1981. — 239 с.
9. *Малков Л.М.* Определение величины испарения с поверхности торфяных массивов / Торфяная промышленность, 1970. №6. С.4-6. **ГИАБ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Кремчев Эльдар Абдоллович* — кандидат технических наук, доцент, kremcheev@spmi.ru, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

*Афанасьев Алексей Егорович* — доктор технических наук, профессор,

*Ефремов Алексей Сергеевич* — аспирант,

Тверской государственной технической университет,

