

УДК 536.2:532/533; 532.72; 66.021.3

А.И. Фильков, Д.А. Гладкий

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ СЛОЯ ТОРФА¹**

Предложена однотемпературная математическая модель сушки слоя торфа. Торф считался многофазной средой, состоящей из сухого органического вещества, свободной и связанной воды, газовой фазы. Численное решение математической модели осуществлялось итерационно-интерполяционным методом.

Ключевые слова: *низкотемпературная сушка, торф, многофазная среда, торфяные пожары, прогноз.*

Торфяные пожары происходят регулярно. В случае возникновения их очень трудно погасить, несмотря на обширные дожди или попытки пожарных. Эти пожары могут длиться в течение значительных периодов времени (от недели и до нескольких лет [1, 2]) и распространяться на обширные площади. Например, только в московском регионе масштабные торфяные пожары за последние 50 лет были зафиксированы в 1972, 1992, 2002 и 2010 гг. По данным МЧС, всего с начала пожароопасного периода 2010 г. на территории Московской области возникло 996 очагов природных пожаров на площади 546 гектаров, из них 443 торфяных. По официальным данным, ежедневно в Подмоскovie регистрировались около 50 очагов торфяных пожаров.

Почвенные пожары часто возникают в органическом материале, накопленном в поверхностных слоях леса (например, лесная подстилка или перегной) и могут стать причиной возникновения торфяного пожара. В странах, где господствует умеренный и северный климат, в результате торфяных пожаров может сгорать до 50 % от общего количества сгоревшей биомассы. Эти пожары являются причиной значительной доли загрязнений, выбрасываемых в атмосферу во время природных пожаров [1]. По сравнению с эмиссиями вредных веществ от лесных пожаров, при тлении торфа производится на 30 % больше CO_2 и на 20 % больше углеводородов [3].

Несмотря на негативные последствия торфяных пожаров, до сих пор не разработана научно-обоснованная система прогноза возникновения этих пожаров, которая бы позволила оценивать вероятность появления торфяного пожара с учетом природной, антропогенной нагрузок, характеристик местности и напочвенного покрова, а также метеорологической обстановки.

Согласно [4], среди основополагающих факторов, влияющих на возникновение низовых лесных и торфяных пожаров, следует выделить следующие:

1. Способность растительных горючих материалов (РГМ) к воспламенению, т.е. состояние, при котором РГМ может воспламеняться от внешнего источника огня.

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, грантов Роснауки г/к № 02.740.11.0674, РФФИ №11-01-00673-а, РФФИ №10-01-91054 НЦНИ-а и РФФИ №12-01-00142-а.

2. Способность РГМ к распространению огня, т.е. состояние при котором огонь может самопроизвольно распространяться вдоль слоя РГМ.

3. Наличие природных и антропогенных источников огня.

Наибольший интерес представляет исследование влияния первых двух упомянутых выше факторов. Очевидно, что они напрямую связаны с влагосодержанием и сушкой РГМ. Кроме того, следует заметить, что влагосодержание РГМ, при котором РГМ способны к воспламенению, и влагосодержание, при котором огонь способен распространяться вдоль слоя РГМ без дополнительных источников энергии, различны, кроме того, эти значения различны для различных типов РГМ. Поэтому решение задачи о сушке РГМ занимает важнейшее место в процессе прогноза пожарной опасности.

Зная характеристики слоя торфа для конкретной местности, можно оценить вероятность ее пожарной опасности, а также рассчитать пожарную опасность для всех участков, входящих в исследуемую область, что, в свою очередь, позволит оптимально использовать ресурсы, направленные на предотвращение возникновения и ликвидацию пожара.

Проведенный обзор показал, что основная масса работ посвящена исследованию гидрологии почв и применению этих моделей для заболоченных территорий. Так, например, Kellner и Halldin [5] обнаружили, что транспорт и распределение влаги в болоте в основном одномерны, и предположили, что одномерная модель, разработанная для минеральных почв, могла быть приспособлена для моделирования гидрологии торфов. Kennedy and Price [6] использовали одномерную модель для исследования транспорта влаги в результате таяния снегов и связей между изменением объема торфа и гидрологией торфяных выработок. Несколько моделей, например, ECOUL [7] и FLOCR 2.0 [8], направлены на исследование поведения сжатия деформируемых глин. Kennedy and Price [9] предложили использовать модель FLOCR с модификациями для исследования гидрологии выработанных торфяников, в частности усадки и течений в средах с переменной влажностью.

Модели динамики грунтовых вод используются для расчета скорости и направления движения грунтовых вод через водоносные слои (например, Modflow – трехмерная модель динамики грунтовых вод [10]). Были сделаны попытки разработать модели для заболоченных территорий на основе Modflow, для моделирования многомерных поверхностных стоков через плотную растительность и колебания уровней вод на заболоченных территориях [11]. Однако данные гидрологические характеристики были рассчитаны для больших масштабов (региональный уровень). На уровне экосистемы в последние годы существенные усилия были направлены на развитие моделей для исследования биологических и физических процессов, управляющих динамикой углерода, воды и азота в почвах. Например, модель развития экосистемы – BIOME-BGC (BBGC), позволяет моделировать в течение суток стоки и запасы углерода, азота, и воды прежде всего в минеральных почвах [12]; модель COUP, первоначально разработанная для моделирования процессов в лесных почвах, является обобщенной моделью, которая позволяет моделировать процессы тепло- и массообмена во всех типах почв, независимо от растительного покрова [13]; модель Wetland-DNDC предсказывает биогеохимию углерода и азота в лесных заболоченных территориях [14]; Expert-N – система, состоящая из модульных компонентов для расчета стока воды и тепла в почву, переноса азота и роста урожая [15]; модель SHAW позволяет рассчитывать детально динамику тепла, воды и движение раствора через растительный покров, снег и почву [16].

Принципиального различия в методах, используемых в вышеупомянутых моделях для изучения стока воды и тепла в почву, нет. В основном, все они используют одномерную схему профиля почвы для описания баланса воды в почве и ее аккумуляции. Отличаются главным образом моделями, используемыми для описания свойств задержания воды в почве. Предполагается, что тепловой поток является одномерным и распространяется за счет теплопроводности, которая моделируется стандартными методами физики почвы [17]. Используя подобный подход, несколько моделей были разработаны для выяснения процессов, проходящих в торфе и вызывающих изменение уровня грунтовых вод и температуры в торфяниках [18–20]. Однако ни одна из этих моделей не объясняет изменения в свойствах влагоудержания с изменением состава торфа по глубине.

Знание профиля влагосодержания торфа крайне важно для моделирования процессов, связанных с условиями увлажнения торфяников. К сожалению, во всех рассмотренных выше моделях динамика влажности в слое торфа описывается эмпирическими формулами, вид которых определяется поставленными задачами. При этом основной целью исследователей является определение уровня грунтовых вод, а также динамики углерода и азота. Работы, посвященные моделированию процесса сушки торфяников для оценки пожарной опасности, отсутствуют.

Среди наиболее близких работ можно выделить работу [21], посвященную математическому моделированию температурно-влажностных режимов почвогрунтов. В данной работе рассматривались процессы тепломассопереноса в многослойной почвенной структуре, каждый слой моделировался четырехфазной пористой средой. Данная модель позволяет довольно точно рассчитывать искомые характеристики в почве. Однако громоздкость математической постановки и большое время счета не позволяют ее использовать для оперативного прогноза. Таким образом, необходимо разрабатывать относительно простые и в то же время достаточно точные и физически обоснованные математические модели для прогноза динамики сушки заболоченных территорий с целью прогноза их пожарной опасности.

Постановка задачи

Будем считать, что сушка слоя торфа происходит в результате воздействия внешней среды. Рассматривается одномерная задача в декартовой системе координат: ось z направлена вертикально вниз, начало координат по оси z выбирается на границе раздела слоя торфа и атмосферы. Физическая модель представлена на рис. 1.

Математическая модель сушки слоя торфа является однотемпературной, т.е. газовая фаза и конденсированная фаза (каркас) имеют одинаковую температуру. Так как процесс сушки слоя торфа в природе происходит при невысоких температурах, предполагаем, что в самом слое торфа имеет место только испарение свободной воды. Торф в процессе сушки

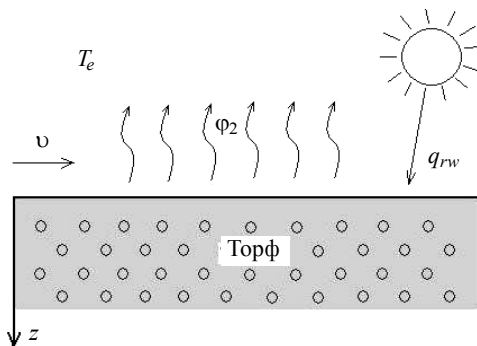


Рис. 1. Физическая модель сушки слоя торфа: v – скорость ветра, T_e – температура окружающей среды, ϕ_2 – объемная доля воды, q_{rw} – плотность потока, результирующего излучения от Солнца

считался многофазной средой, состоящей из сухого органического вещества с объемной долей φ_1 , свободной и связанной воды с объемной долей φ_2 , газовой фазы φ_3 . Рассматривался такой слой торфа, у которого начальная объемная доля газовой фазы φ_{3in} ($0,1 < \varphi_{3in} < 0,2$) невелика по сравнению с объемными долями конденсированной фазы. Эта математическая модель представляет частный случай модели, предложенной в [22].

Математически сформулированная выше задача с учетом сделанных допущений сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho_3 \varphi_3}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 \varphi_3 v}{\partial z} = Q; \quad (1)$$

$$v = -\frac{\xi}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}, \quad P = \frac{\rho_3 R T}{M_3}; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^2 c_{pis} \rho_{is} \varphi_i \frac{\partial T}{\partial t} + c_{p3} \rho_3 \varphi_3 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - q_{2s} R_{2s}; \quad (3)$$

$$\varphi_1 = \varphi_{1in}, \quad \varphi_3 = 1 - \varphi_1 - \varphi_2; \quad (4)$$

$$\rho_{2s} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}; \quad (5)$$

$$Q = R_{2s}, \quad R_{2s} = \frac{\rho_{2s} \varphi_2 k_{2s} \exp(-E_{2s} / RT)(1 - RH)}{\sqrt{T}}. \quad (6)$$

Для решения системы уравнений (1) – (6) используются следующие начальные и граничные условия:

$$T|_{t=0} = T_{in}, \quad \rho_3|_{t=0} = \rho_{3in}, \quad \varphi_i|_{t=0} = \varphi_{iin}, \quad i = 1, 2; \quad (7)$$

$$P|_{z=0} = P_e, \quad \frac{\partial P}{\partial z}|_{z=L} = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0} = \alpha_e (T_e - T_w) + \varphi_{sw} q_{rw} - q_{2s} R_{2s}, \quad T|_{z=L} = T_{in}; \quad (8)$$

$$q_{rw} = (1 - A) q_R(h) \cos \alpha - \varepsilon_s \sigma T_w^4 + J_w \cos \alpha, \quad (9)$$

где t – время; z – пространственная координата; φ_i , $i=1,2,3$ – объемные доли; $i = 1, 2, 3$, – торф, свободная и связанная вода, газовая фаза; ρ_i , $i = 1, 2, 3$ – плотности; v – скорость газообразных продуктов реакции испарения; Q – массовая скорость образования газовой фазы; P – давление газа в порах; $\mu = \mu_{in} (T / T_{in})^{0,5}$ – коэффициент динамической вязкости смеси газов; $\xi = \xi_* \varphi_3^3 / (1 - \varphi_3)^2$ – функция, описывающая влияние объемной доли на сопротивление; $\xi_* = d_p^2 / 120$ – характерная проницаемость; d_p – диаметр пор; M_3 – молекулярный вес газа; R – универсальная газовая постоянная; T – температура торфа; C_{pi} , $i=1,2,3$ – коэффициент теплоемкости; k_{2s} – предэкспоненциальный множитель реакции испарения; E_{2s} – энергия активации, характеризующая испарение воды; R_{2s} – массовая скорость испарения свободной и связанной воды в торфе; q_{2s} – тепловой эффект реакции R_{2s} ; λ – коэффициент теплопроводности; T_e – температура окружающей среды; α_e – коэффициент теплообмена торфа с внешней средой; $\varphi_{sw} = \varphi_{s1} + \varphi_{s2}$ – объемная доля конденсированной фазы на верхней границе слоя торфа; q_{rw} – плотность потока результирующего излучения на границе раздела сред; A – альбедо слоя торфа; $q_R(h)$ – суммарный радиационный поток на верхней границе слоя торфа; α – угол между горизонтальной плоскостью и слоем торфа; ε_s – коэффициент черноты слоя; σ – постоянная Стефана – Больцмана; J_w – плотность потока длинноволно-

вого излучения на верхней границе слоя торфа; RH – относительная влажность воздуха. Индексы: s – конденсированная фаза; e – внешняя среда; in – начальное значение; w – параметры состояния при $z = 0$.

Методика расчета и база данных

Численное решение данной системы уравнений осуществлялось итерационно-интерполяционным методом с постоянным по времени шагом в соответствии с методикой, описанной в [23]. По результатам численных расчетов анализировалось изменение начальных объемных долей, давления и температуры для различных временных интервалов.

В расчетах были использованы следующие значения параметров: $L = 1$ м, $T_{in} = 278$ К, $\lambda_1 = 0,041$ Вт/(м·К), $C_{p1} = 951$ Дж/(кг·К), $C_{p2} = 4183$ Дж/(кг·К), $C_{p3} = 1020$ Дж/(кг·К), $M_3 = 0,029$ кг/моль; $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\rho_3 = 1,18$ кг/м³, $d_p = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $R = 8,314$ Дж/(моль·К); $\alpha = 0^\circ$; $q_{2s} = 2250$ Дж/кг; $\varepsilon_s = 0,7$; $A = 0,6$; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); $\phi_{in} = 0,243$; $\phi_{2in} = 0,598$; $\phi_{3in} = 0,159$; $\mu_{in} = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с; $E_{2s} = 36762$ Дж/моль; $k_{2s} = 0,482 \cdot 10^4$ К^{0.5}·с⁻¹; $\rho_1 = 815$ кг/м³; $W = 312$ %. Для перехода от влаго-содержания к объемным долям использовались формулы, предложенные в [24]. В качестве метеорологической информации использовались данные по температуре воздуха и почвы, относительной влажности воздуха, скорости ветра, суммарному радиационному потоку с 18 по 24 мая 2000 г. с интервалом в 3 часа, предоставленные Государственным учреждением «Новосибирский ЦГМС-РСМЦ» и Институтом оптики атмосферы СО РАН. Выбор данного промежутка времени объясняется тем, что весенний период является одним из наиболее пожароопасных, кроме того, продолжительности в одну неделю достаточно для учета суточных колебаний параметров сушки. Торф, для которого проводился качественный анализ, и метеоинформация соответствовали Тимирязевскому лесхозу Томской области.

Для количественной проверки результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными процесса сушки в изотермических условиях, при температуре 50 °С, и динамических, при скоростях нагрева 20 и 30 К/мин [25, 26], полученными для трех видов торфа. Термокинетические константы и начальные данные для процесса сушки трех типов торфа приведены в таблице [26].

Характеристики образцов торфа [26]

Параметры	Образец 1	Образец 2	Образец 3
E_{2s} , Дж/моль	36762	36029	42346
k_{2s} , К ^{0.5} ·с ⁻¹	$0,482 \cdot 10^4$	$0,467 \cdot 10^4$	$0,450 \cdot 10^5$
ρ_1 , кг/м ³	815	282	385
W , %	312	298	180

Результаты численного решения и их анализ

Для определения оптимального шага по времени и точек по пространству были проведены математические эксперименты, в которых исследовалось влияние их изменения на получаемый результат при решении системы (1) – (5). Было установлено, что решение сходится с уменьшением шага интегрирования. Однако разница в значениях относительных погрешностей δP , δT , и δW для временного шага 0,1 с и 100 с составила менее 1 %. Поэтому в качестве эталонного решения можно принять результаты расчетов при шаге 50 с.

Анализ результатов расчетов с различным количеством точек по глубине показывает, что увеличение количества точек практически не влияет на давление и влагосодержание, так разница между максимальным (900 точек) и минимальным (50 точек) количеством точек составила менее 1 % для глубины 1 м. В то же время для температуры эта разница составила около 7 %. Исходя из того, что для расчетов динамики влагосодержания большого количества торфяных участков может потребоваться значительное время при использовании большого количества точек по глубине, в качестве компромисса между временем счета и точностью можно взять 200 точек для глубины 1 м. При этом относительная погрешность искомых параметров составит менее 2 %.

Параметрический анализ

В результате численного решения математической модели (1) – (5) с учетом реальных метеоусловий для временного промежутка в одну неделю были проведены тестовые расчеты и получены зависимости температуры слоя торфа (рис. 2), давления и параметров состояния среды на верхней границе торфа (рис. 3), влагосодержания (рис. 4) от времени.

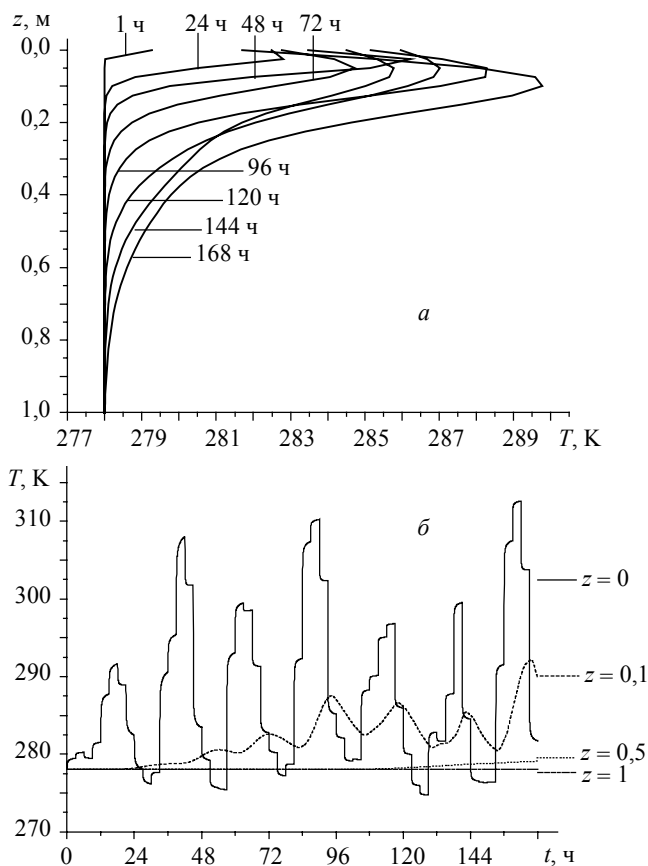


Рис. 2. Распределение температуры слоя торфа в различные моменты времени:
 а – по глубине слоя, б – для различных значений z

Из анализа численного решения, приведенного на рис. 2, *а*, следует, что с ростом времени температура на верхней границе растет и слой начинает равномерно прогреваться от поверхности в глубь слоя. Перегиб температуры слоя торфа на верхней границе связан с задаваемой температурой воздуха. Кривые на рис. 2, *а* соответствуют полуночи. В это время температура воздуха низкая, а температура верхнего слоя торфа выше за счет прогрева за предыдущие сутки и к 00.00 часов торф не успевает остыть. Из рис. 2, *б* видно, что температура слоя торфа при $z = 0$ напрямую зависит от параметров окружающей среды, возрастает и убывает в зависимости от времени суток. С увеличением глубины слоя зависимость уменьшается и при $z = 0,5$ суточные колебания метеопараметров не влияют на температуру слоя, что согласуется с [27]. При этом тепловая волна доходит до глубины 0,5 м только на 5-е сутки.

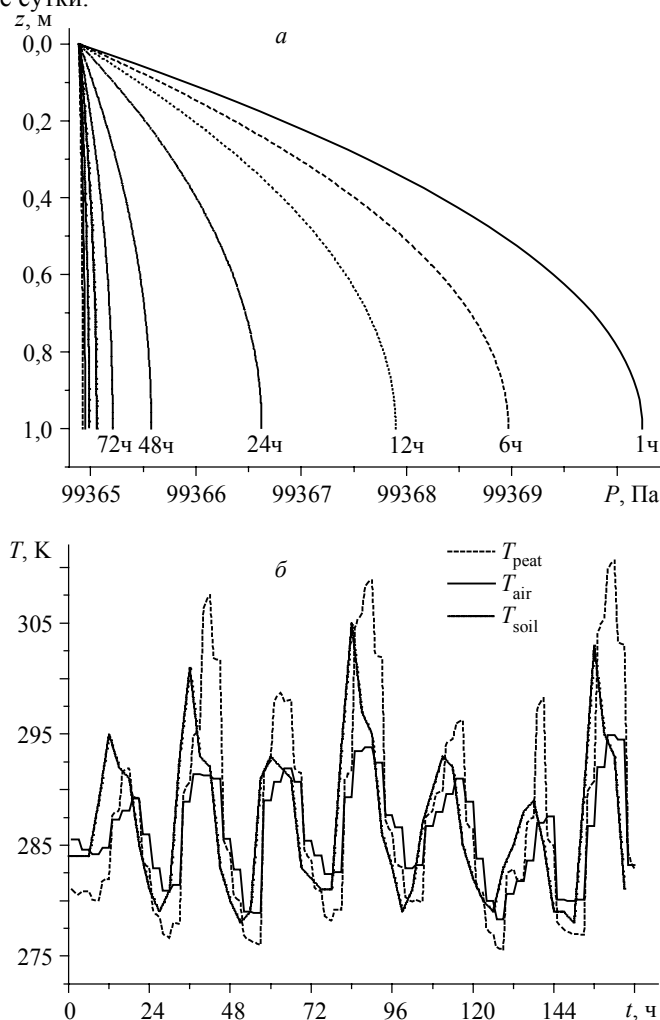


Рис. 3. Зависимость давления газовой фазы от глубины слоя торфа в различные моменты времени (*а*), профили температуры параметров состояния среды в различные моменты времени на верхней границе слоя торфа (*б*)

Из рис. 3, *a* видно, что давление газовой фазы в слое торфа растет по глубине, что соответствует физике процесса. Однако в процессе сушки за счет фильтрации газов давление начинает выравниваться и стремиться к атмосферному. Также видно, что кривая температуры слоя торфа на рис. 3, *б* качественно согласуется с приведенными данными. С ростом температуры воздуха возрастает температура торфа и с понижением соответственно падает. При этом в самые жаркие часы температура слоя торфа и почвы значительно выше температуры воздуха. Это объясняется нагревом за счет излучения от Солнца. Так как коэффициент черноты торфа выше, чем почвы, то пик температуры торфа превышает температуру почвы на несколько градусов. Максимум различия между температурой воздуха и торфа составляет около 15 градусов. Согласно [28], при воздействии солнечного излучения температура верхнего слоя торфа может быть на 15–17 °С выше температуры окружающей среды, что соответствует нашим результатам. Также известно [29], что суточное испарение почти прямо пропорционально количеству часов солнечного сияния в течение дня, причем из общего количества солнечной радиации, падающей на поверхность торфа, около 60 % приходится на сушку торфа, и температура поверхности торфа при этом значительно превышает температуру окружающего воздуха.

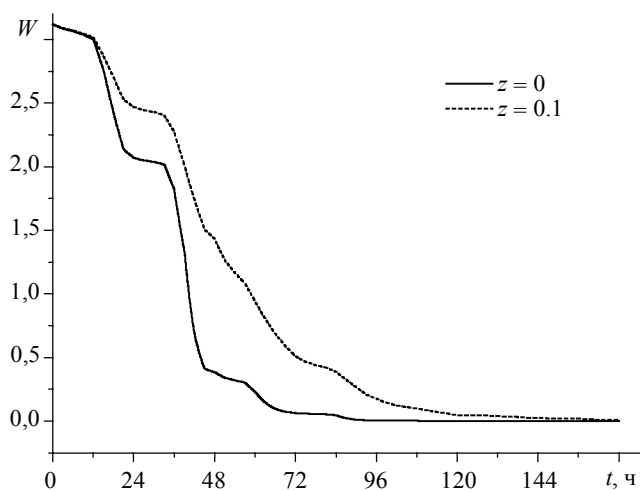


Рис. 4. Изменение влагосодержания слоя торфа в течение недели для различных значений глубины z . Время 0 часов соответствует полуночи

Из анализа кривых на рис. 4 видно, что сушка верхнего слоя торфа с ростом времени происходит довольно быстро. При этом она зависит от параметров окружающей среды. Участки кривых, на которых влагосодержание слоя торфа меняется медленно, соответствуют ночному периоду суток. В этот промежуток времени отсутствует излучение от Солнца, понижается температура воздуха, и поэтому скорость сушки замедляется. Видно, что при отсутствии осадков и положительных температурах воздуха уже на пятые сутки верхний слой толщиной 0,1 м высыхает до влагосодержания, меньше критического. И соответственно может воспламениться от любого источника зажигания.

Сравнение с экспериментом

Численные эксперименты проводились для изотермических условий при температуре сушки 50 °С для трех видов торфа. Моделировались условия сушки галогеновой лампой в анализаторе влажности AND MX-50. Согласно [26], слой торфа в расчетах имел глубину 0,015 м. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными представлено на рис. 5 для глубины 0,0075 м.

Из анализа кривых на рис. 5 видно, что начиная с некоторого момента времени скорость сушки торфа замедлялась, в отличие от расчетных данных. Данный момент времени определяется конечной стадией сушки, когда экспериментальная кривая начинает выходить на стационар. Это различие с численными данными связано с особенностью математической модели, где сделано допущение о том, что в слое торфа имеет место только испарение свободной воды. То есть в модели (1) – (5) свободная и связанная вода объединены и описываются одним параметром. Таким образом, при долгосрочных прогнозах (более недели), данная модель будет давать заниженные значения влагосодержания и соответственно повышенную пожарную опасность.

В работе [26] показано, что энергии активации для трех рассмотренных типов торфа имеют близкие значения, и делается вывод о возможности использования единственного оптимального значения кинетических параметров для математического моделирования процесса сушки торфов. Для проверки данной гипотезы были взяты средние значения кинетических параметров (таблица) и на их основе проведены расчеты. На рис. 6 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных для аналогичных условий с рис. 5 со средней кинетикой: $E_{2s} = 38379$ Дж/моль, $k_{2s} = 0,88 \cdot 10^4 \text{ К}^{0,5} \cdot \text{с}^{-1}$.

Из рис. 6 видно, что численные результаты отличаются от тех, что получены с отдельной кинетикой для каждого типа торфа. При этом максимальная относительная погрешность численных значений, до выхода на стационар экспериментальной кривой, составляет около 11 % для образцов 1 и 3 и 32 % для образца 2. Видно, что до середины кривых сушки для всех трех типов торфа максимальная относительная погрешность численных значений не превышает 10 %. При этом ранее делался вывод, что с отдельной кинетикой для каждого типа торфа прогноз не должен превышать одной недели. Таким образом, можно предположить, что использование осредненной кинетики допустимо для прогнозирования динамики влагосодержания слоя торфа только для прогноза не более 3 дней.

В случае динамической сушки моделировались условия испарения в термогравиметрическом анализаторе. Расчеты проводились для небольшого слоя торфа глубиной 0,01 м, с предположением, что слой мгновенно прогревается при повышении температуры в соответствии со скоростью нагрева, т.е. температура на верхней и нижней границах одна и та же. Сравнение результатов вычисления с экспериментальными данными для глубины 0,005 м представлено на рис. 7.

Результаты сравнения показывают удовлетворительное совпадение данных для образцов торфа 1 и 2. Различие данных для образца 3 можно объяснить низкой степенью разложения – 10,5 % (против 20 и 40 % у образцов 1 и 2) и соответственно сильной его неоднородностью. Также видно, что с ростом температуры экспериментальные и численные данные начинают расходиться. Однако данный процесс начинается с 350 К для образцов 1 и 2 и с 330 К для образца 3.

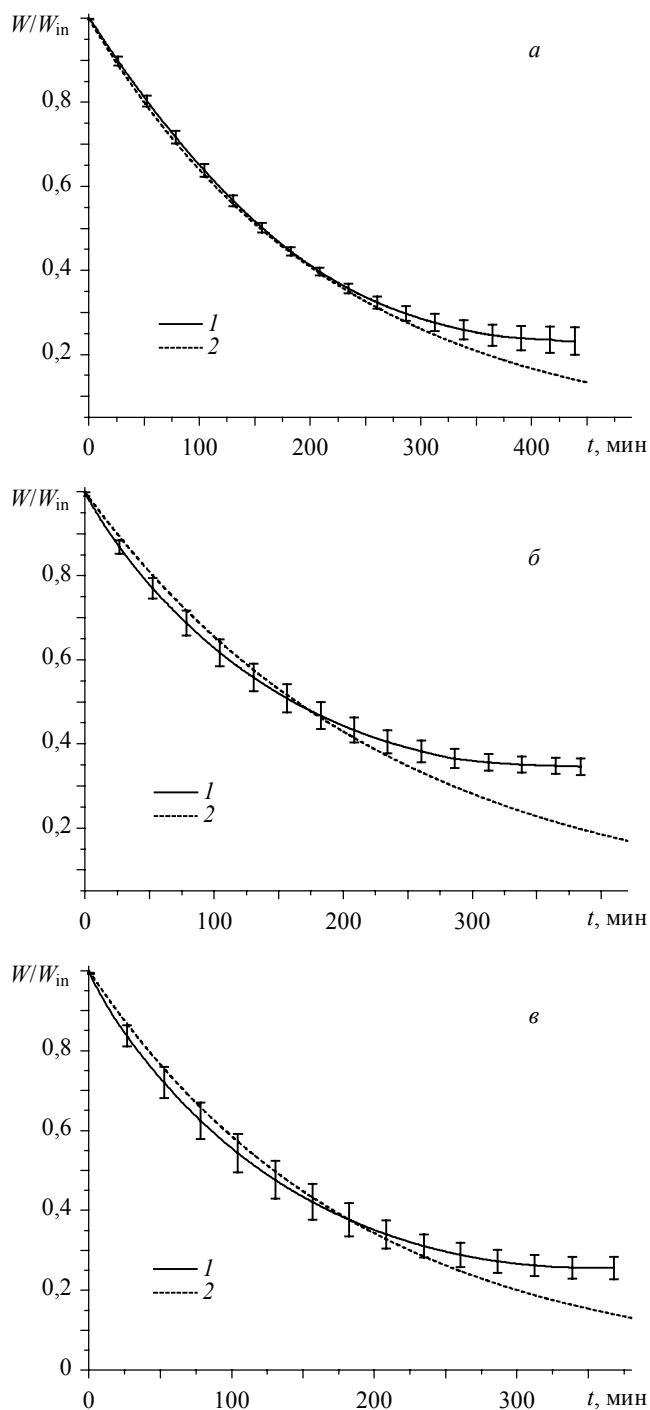


Рис. 5. Сравнение расчетных (пунктирные линии) и экспериментальных [26] (сплошные линии) зависимостей относительного влагосодержания при температуре 50 °С для трех видов торфа: *a* – образец 1, *б* – образец 2, *в* – образец 3

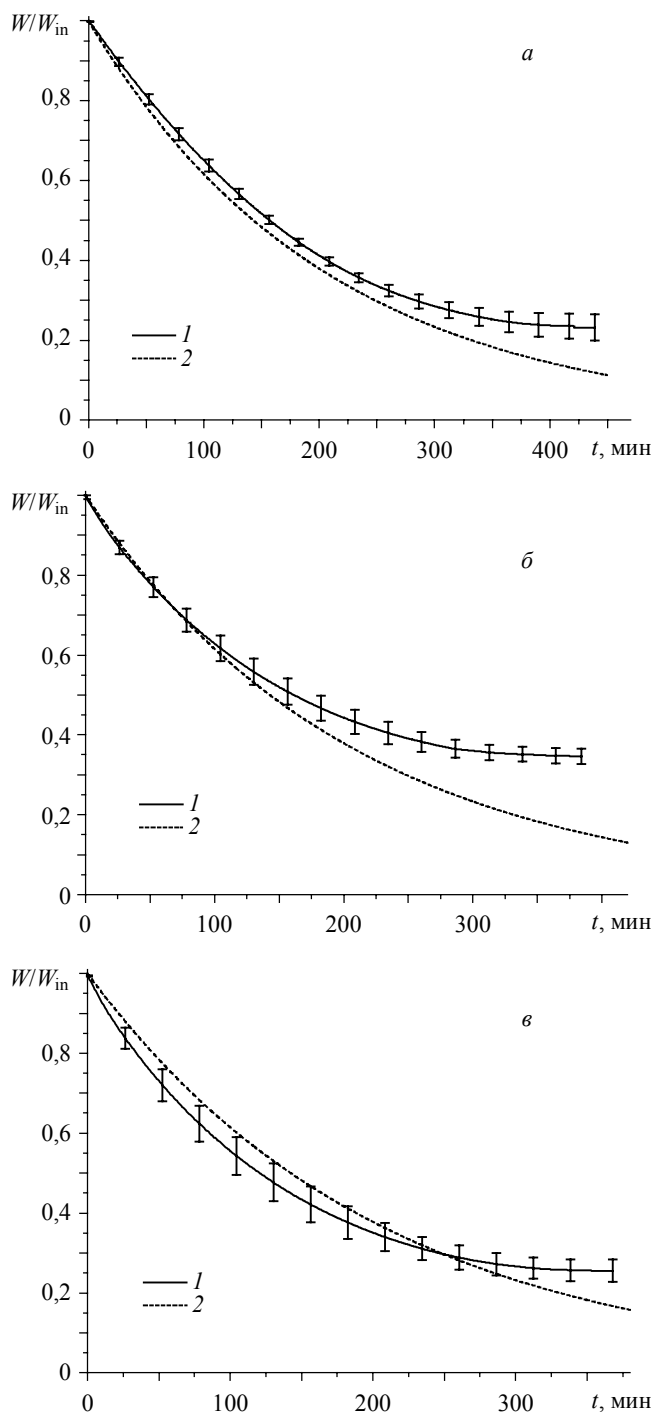


Рис. 6. Сравнение экспериментальных (1) [26] и расчетных (2) зависимостей относительного влагосодержания при температуре 50 °С для трех видов торфа: *a* – образец 1, *б* – образец 2, *в* – образец 3

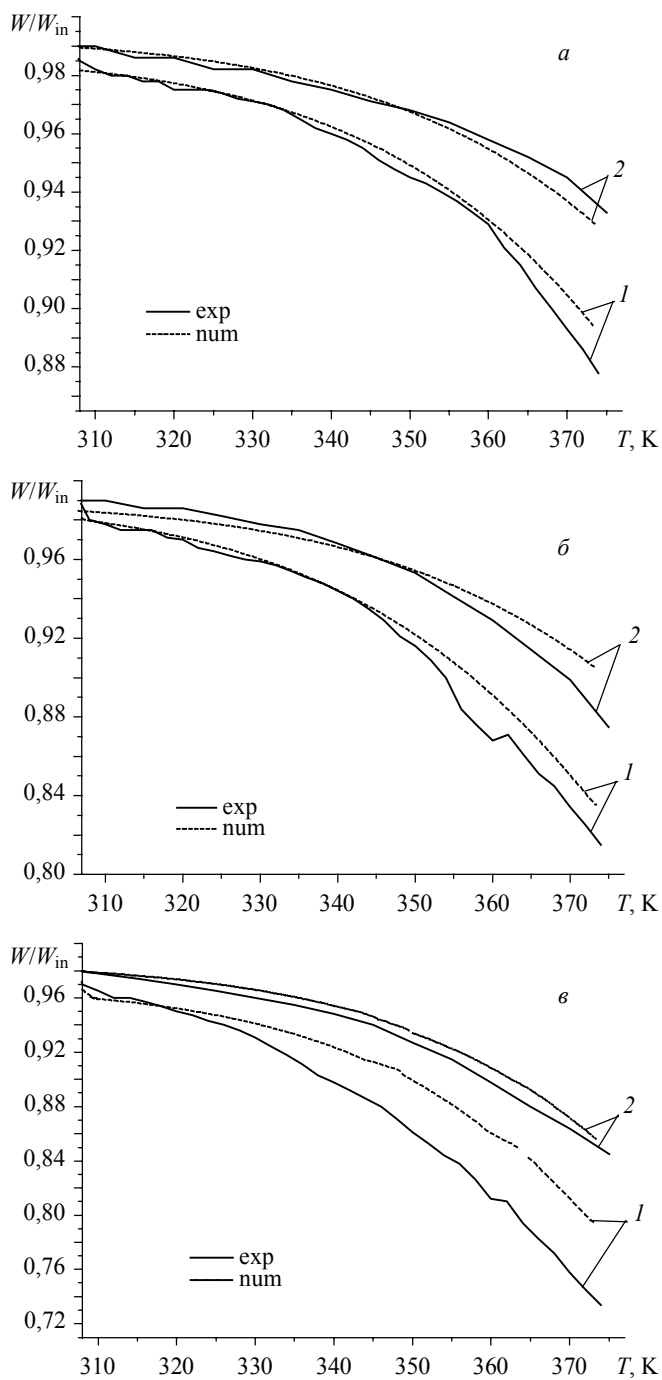


Рис. 7. Сравнение расчетных (пунктирные линии) и экспериментальных [25] (сплошные линии) зависимостей относительного влагосодержания для скоростей нагрева 20 (кривые 1) и 30 (кривые 2) К/мин для трех видов торфа: *a* – образец 1, *б* – образец 2, *в* – образец 3

Заключение

Проведенное математическое исследование показывает, что полученные численные результаты качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными. Однако данная модель, как и любая другая, имеет ряд ограничений. В частности, для получения оптимальной точности максимальная температура сушки не должна превышать 330 К и время прогноза – одну неделю. В связи с тем, что температура воздуха в бореальной зоне редко превышает 320 К, можно сделать вывод, что предложенная математическая постановка задачи (1) – (9) может быть использована для прогнозирования поведения влагосодержания и температуры в слое торфа для последующего прогноза пожарной опасности на торфяниках. Выдвинуто предположение о допустимости использования осредненной кинетики для прогнозирования динамики влагосодержания рассмотренных типов торфов.

Авторы выражают благодарность Гришину А.М., Цимбалюку А.Ф. и Кузнецову В.Т. за содействие в работе и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Page S.E., Siegert F., Rieley J.O., et al. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997 // *Nature*. 2002. No. 420. P. 61–65.
2. Svensen H., Dysthe D.K., Bandlien E.H., et al. Subsurface combustion in Mali: Refutation of the active volcanism hypothesis in West Africa // *Geology*. 2003. V. 31. No. 7. P. 581–584.
3. Bertschi A.A., Yokelson R.J., Ward D.E., et al. Trace gas and particle emissions from fires in large diameter and belowground biomass fuels // *J. Geophysical Research*. 2003. 108 (D13). P. 8.1–8.12.
4. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 1. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 524 с.
5. Kellner E., Halldin S. Water budget and surface-layer water storage in a Sphagnum bog in central Sweden // *Hydrol. Processes*. 2002. No. 16. P. 87–103.
6. Kennedy G.W., Price J.S. A conceptual model of volume change controls on the hydrology of cutover peats // *J. Hydrology*. 2005. No. 302. P. 13–27.
7. Garnier P., Perrier E., Angulo A.J., and Baveye P. Numerical model of 3-dimensional anisotropic deformation and water flow in welling soil // *Soil Sci*. 1997. No. 162. P. 410–420.
8. Oostindie K. and Bronswijk J.J.B. FLOCR – A simulation model for the calculation of water balance, cracking and surface subsidence of clay soils // Rep. 47, Winand Staring Cent., Agric. Res. Dep., Wageningen, Netherlands, 1992.
9. Kennedy G.W., Price J.S. Simulating soil water dynamics in a cutover bog // *Water resources research*. 2004, V. 40. W12410, doi:10.1029/2004WR003099.
10. Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. Modflow-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process // U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 2000. P. 121.
11. Restrepo J.I., Montoya A.M., Obeysekera J. A wetland simulation module for the Modflow ground water model // *Ground Water*. 1998. V. 36. No. 5. P. 764–770.
12. Running S.W., Coughlan J.C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes // *Ecol. Model*. 1988. No. 42. P. 125–154.
13. Jansson P.E., Karlberg L. Coupled heat and mass transfer model for soil – plant – atmosphere systems // Royal Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Stockholm, 2001. P. 321.
14. Zhang Y.Li., Trettin C., et al. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems // *Global Biogeochem. Cycles*. 2002. V. 16. No. 4. P. 1–17.

15. Engel T., Priesack E. Expert-N, a building-block system of nitrogen models as resource for advice, research, water management and policy // Eijsackers, H.J.P., Hamers, T. (Eds.), *Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1993. P. 503–507.
16. Flerchinger G.N., Saxton K.E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system. I. Theory and development // *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 1989. V. 32. No. 2. P. 565–571.
17. Hillel D. *Fundamentals of Soil Physics*. N.Y.: Academic Press, 1980. 413 p.
18. Frolking S., Crill P. Climate controls on temporal variability of methane flux from a poor fen in southeastern New Hampshire: measurement and modeling // *Global Biogeochem. Cycles*. 1994. No. 8. P. 385–397.
19. Granberg G., Grip H., Ottoson Lofvenus M., et al. A simple model for simulation of water content, soil frost, and soil temperatures in boreal mixed mires // *Water Resour. Res.* 1999. No. 35. P. 3771–3782.
20. Guertin D.P., Barten P.K., Brooks K.N. The peatland hydrological impact model: development and testing // *Nord. Hydrol.* 1987. No. 18. P. 79–100.
21. Исаков Г.Н., Кузин А.Я., Кулижский С.П., Субботин А.Н. Прогнозирование структурного состояния и температурно-влажностных режимов переноса в верхних горизонтах почвогрунтов // *Труды 4 Минского Международного форума по тепломассообмену*. Минск, 2000. С. 160–169.
22. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 2. Кемерово: Практика, 2005. 562 с.
23. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н. и др. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения: учеб. пособие. Томск, 2004. 320 с.
24. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. 218 с.
25. Cancellieri D., Leroy-Cancellieri V., Leoni E., et al. Kinetic investigation on the smouldering combustion of boreal peat // *Fuel*. 2012. V. 93. P. 479–485.
26. Kuzin A.Ya., Filkov A.I., Sharypov O.V., et al. A comparative study to evaluate the drying kinetics of Boreal peats from micro to macro scales // *Energy Fuels*. 2012. V. 26. No. 1. P. 349–356.
27. Ковриго В.П., Кауричев И.С., Бурлакова Л.М. Почвоведение с основами геологии. М.: Колос, 2000. 416 с.
28. Миронов В.А., Палюх Б.В., Ветров А.Н. Основы построения интеллектуальных информационных систем для прогнозирования, предупреждения и ликвидации торфяных пожаров: Монография. Тверь: ТГТУ, 2004. 104 с.
29. Соловьев С.В. Экологические последствия лесных и торфяных пожаров: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03, 03.00.16. М., 2006. 222 с.

Статья поступила 17.04.2012 г.

Fil'kov A.I., Gladkii D.A. MATHEMATICAL MODELING OF LOW-TEMPERATURE DRYING OF A PEAT LAYER. A one-temperature mathematical model for drying of a peat layer is proposed. Peat is considered to be a multiphase media consisting of a dry organic substance, free and bound water, and gas phase. The iterated-interpolation method is used to solve numerically the mathematical model.

Keywords: low-temperature drying, peat, multiphase medium, peat fires, forecast

FIL'KOV Alexander Ivanovich (Tomsk State University)

E-Mail: filkov@mail.tsu.ru

GLADKII Denis Andreevich (Tomsk State University)

E-Mail: six9teen@sibmail.com