

Результаты вычислений приведены на рис.3÷5. Видно, что изменение температуры за счет влияния электрода может достигать 10%. Поэтому в случае использования высокотеплопроводных электродов для крепления образцов с одновременным их использованием в качестве датчиков температуры, требуется оценка влияния утечек тепла на погрешность измерения.

УДК 630*843:519.001.57

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

**А.М. Гришин, А.Н. Голованов, А.А. Долгов, Е.Л. Лобода,
Н.В. Барановский, С.В. Русаков**

Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: fire@fire.tsu.tomsk.su

Пожары представляют угрозу жизни и здоровью человека и животных, обитающих в лесу, уничтожают собственность, оказывают негативное влияние на состояние окружающей среды. Поэтому очень важно дать точный прогноз возникновения лесных пожаров. Это позволит сосредотачивать силы и средства лесных пожарных в предполагаемые зоны возгорания. В связи с тем, что воспламеняются только достаточно сухие лесные горючие материалы (ЛГМ) прогноз пожарной опасности не возможен без определения времени сушки ЛГМ на подстилающей поверхности. Необходимо комплексное экспериментальное и теоретическое исследование сушки лесных горючих материалов.

1. Экспериментальное исследование сушки ЛГМ

1.1. Об испарении свободной и связанной влаги в лесных горючих материалах

Процесс испарения влаги является одной из лимитирующих стадий горения лесных горючих материалов (ЛГМ) при лесных пожарах [1]. Кроме того, аэрокосмический мониторинг пожарной опасности в лесных биогеоценозах нуждается в информации о влагосодержании ЛГМ [2].

Проведено экспериментальное исследование испарения капель жидкости с поверхностей типичных элементов ЛГМ (см. рис.1) – хвои сосны, кедра, ели, а также сушка ЛГМ в постановке задачи аналогичной [3]. Получены закономерности для скорости испарения капель $(\rho v)_w$ в зависимости от влагосодержания хвои w , шероховатости поверхности R_z . Скорость испарения свободной влаги (капли воды) сравнивается со скоростью сушки – скоростью испарения влаги, связанной с материалом физико-химически (адсорбционная и осмотическая влаги) и физико-механически (капиллярная влага).



Рисунок 1. Капля, расположенная на хвое ели.

Для математического моделирования лесных пожаров процессы сушки ЛГМ описываются с помощью закона

$$\frac{dm}{dt} = \frac{AmSM}{\sqrt{2\pi MRT}} p_0 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad (1)$$

где m – масса, S – площадь поверхности, M – молекулярная масса воды, A – коэффициент аккомодации, E_2 – эффективная теплота испарения, p_e – парциальное давление воды во внешней среде, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура в предположении, что при высоких температурах, сопровождающих фронт лесного пожара, давление насыщенного пара

$$p_n = p_0 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \gg p_e,$$

где p_e парциальное давление влаги. В работе показано, что для низкотемпературной сушки ЛГМ в формуле (1) необходимо учитывать величину p_e , которая становится сравнимой с давлением насыщенного пара и приводит к иным значениям эффективных констант испарения E_2 и k_2 .

Информация о законах испарения свободной и связанной воды в ЛГМ при их низкотемпературной сушке в результате природных и атмосферных факторов позволяет с помощью математического моделирования осуществить прогноз пожарной опасности лесных биогеоценозов [3].

1.2. Об испарении влаги в слое лесных горючих материалов

Одним из способов прогноза пожарной опасности лесных биогеоценозов является математическое моделирование комплексной задачи о сушке лесных горючих материалов (ЛГМ) в сопряженной постановке, включающую процессы тепло и массообмена приземного слоя атмосферы и напочвенного покрова [3].

Математическая модель [3] нуждается в количественных значениях теплокинетических постоянных неравновесной сушки ЛГМ. E_2/R , k_2 , где E_2 – эффективная теплота испарения влаги (аналог энергии активации в химической кинетике), R – универсальная газовая постоянная, k_2 – частотный фактор. Для высоких температур, реализуемых во фронте лесного пожара, испарение влаги в слое ЛГМ подчиняется закону [1]

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{A(m - m_1)SM}{\sqrt{2\pi MRT}} \left[p_0 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) - p_e \right], \quad (2)$$

где m – масса ЛГМ, m_1 – масса высушенной хвои, τ – время, A – эмпирический коэффициент, S – эффективная площадь поверхности, M – молекулярная масса воды, T – абсолютная температура, p_0 – термическое давление влаги [4], p_e – парциальное давление паров воды. При высоких температурах (от 333 до 423 К) давление насыщенного пара

$$p_n = p_0 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \gg p_e. \quad (3)$$

поэтому в работах, посвященных решению конкретных задач о математическом моделировании распространения лесных пожаров [1] p_e не учитывалось.

С учетом неравенства (3) в работе [5] по методике [1] найдены термокинетические константы для высоких температур $t = (333 \div 403)$ К сушки ЛГМ. Для низких температур

$t < 333 \text{ K}$ и высокой относительной влажности $\varphi = p_e/p_n$ неравенство (3) может не выполняться и для нахождения E_2/R , k_2 необходимо использовать уравнение

$$\frac{dm}{dt} = - \frac{A(m - m_1)SM(1 - \varphi)}{\sqrt{2\pi MRT}} p_n, \quad (4)$$

где φ – относительная влажность, p_n – давление насыщенного пара.

Экспериментальное исследование процесса сушки ЛГМ проводилось в изотермических условиях при температурах $T=303, 325, 345, 369 \text{ K}$ с образцами хвои сосны, кедра, ели, помещенных в сушильный шкаф. Убыль массы образцов определялись взвешиванием на аналитических весах с относительной погрешностью не более 2.5%. Контролировались относительная влажность воздуха в сушильном шкафу, температура и атмосферное давление. Термокинетические константы E_2/R и $k_2 = \frac{ASM(1-\varphi)}{\sqrt{2\pi MR}}$ находились из уравнения (4) методом спрямления Фримена – Кэррола [6]. В таблице приведены расчеты E_2/R и k_2 для живой хвои, полученные в данной работе и в работах других авторов.

Таблица 1

$E_2/R, \text{ k-1}$	4373	5247	4560	5956	2720
$k_2, \text{ k}^{1/2}\text{C}^{-1}$	18.32	$1,487 \cdot 10^5$	2.83	$6.03 \cdot 10^5$	1.88
T, K	303÷369	369	443÷770	333÷403	—
Авторы	[Авторы]	[1]	[7]	[5]	[]

Анализ полученных результатов показывает, что при температурах ниже $t < 60^\circ \text{C}$ для расчетов термокинетических констант сушки ЛГМ необходимо учитывать парциальное давление водяного пара. Значительный разброс в значениях E_2/R и k_2 обусловлен различными условиями проведения экспериментов, а также используемыми методиками результатов измерений.

1.3. Экспериментальное исследование сушки слоя лесных горючих материалов в аэродинамической трубе

С целью проверки достоверности результатов расчетов с использованием модели [3] по сушке лесных горючих материалов (ЛГМ) был проведен ряд экспериментов в аэродинамической трубе.

Объектом исследования являлись образцы ЛГМ: хвоя сосны, ели и кедра. Элементы ЛГМ, расположенные на горизонтальной площадке, обтекались ламинарным потоком воздуха, генерируемым дозвуковой аэродинамической трубой типа МТ-324. Варьировалась плотность укладки ЛГМ с хаотической ориентацией хвои - $\rho=(44.5-110.6) \text{ кг/м}^3$, угол наклона плоскости с расположенными на ней элементами ЛГМ и вектором скорости воздушного потока $\alpha=(0-20)^\circ$ варьировался с помощью специального координатника, скорость потока воздуха $V_e=(0-0.695) \text{ м/с}$ (определялась насадком Пито-Прандтля и микроманометром ММН-240 и термоанемометром), влагосодержание ЛГМ $W=(m-m_0)/m_0$, где m, m_0 – значения массы и абсолютно сухой массы ЛГМ, $W=(0.0539-0.7036)\%$, температура окружающего воздуха $T=(18-29)^\circ \text{C}$. Контролировалось атмосферное давление $P=(748-764) \text{ мм рт. ст.}$ с помощью барометра-апероида БАММ-1,

относительная влажность воздуха $\varphi=(32-77)\%$ с помощью психрометра аспирационного МВ-4М, убыль массы хвои m с течением времени t , которая измерялась на аналитических весах АДВ-200М 2-го класса с точностью 10^{-4} г. Безразмерная убыль массы образцов m/m_0 , где m_0 – начальная масса, характеризует количество испарившейся с поверхности исследуемого материала влаги за время сушки. Время сушки t варьировалось в пределах 90-300 мин. Суммарные погрешности определения параметров не превышали $\delta V_e \leq 4.2\%$, $\delta m \leq 2.1\%$, $\delta T \leq 5.3\%$, $\delta P \leq 6.0\%$, $\delta \varphi \leq 7.9\%$. Доверительные интервалы рассчитывались по результатам 3-5 измерений с доверительной вероятностью 0.95.

Условия обтекания образцов ЛГМ потоком воздуха, метеорологические параметры атмосферы, плотность укладки соответствовали их натурным значениям. Высота слоя h выбиралась таким образом, чтобы образцы ЛГМ находились в пограничном слое

$$h < \delta = \sqrt{Re}, \quad (5)$$

где δ – толщина пограничного слоя, Re – число Рейнольдса.

Выполнение неравенства (5) отвечает природным условиям.

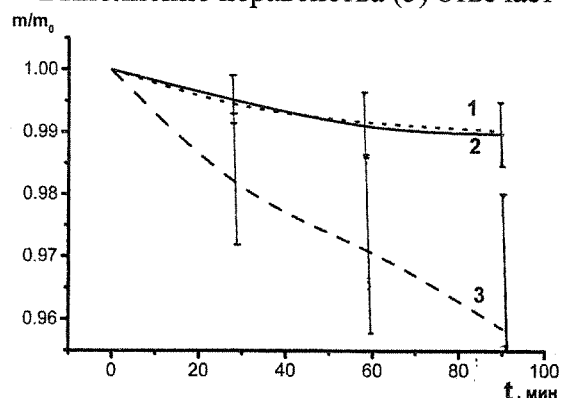


Рис. 2. Экспериментальные данные убыли массы хвои ели и доверительные интервалы с различной плотностью укладки: 1 - $\rho=110.6$ кг/м³, $w=0.0526$, $P=755$ мм рт.ст., $\varphi=76\%$, $T=18^\circ\text{C}$; 2 - $\rho=55.3$ кг/м³, $w=0.0526$, $P=757$ мм рт.ст., $\varphi=72\%$, $T=18^\circ\text{C}$; 3 - $\rho=44.5$ кг/м³, $w=0.413$, $P=754$ мм рт.ст., $\varphi=32\%$, $T=27^\circ\text{C}$.

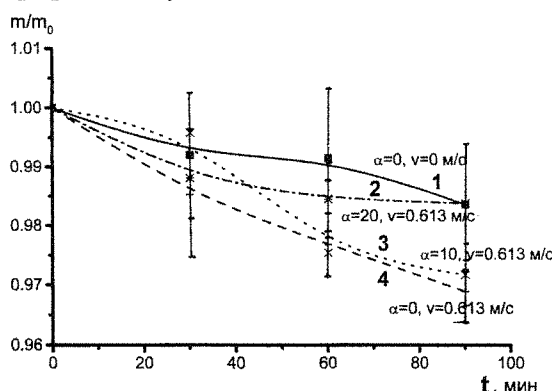


Рис. 3. Экспериментальные данные убыли массы хвои ели и доверительные интервалы с различной плотностью укладки: 1 - $\rho=55.3$ кг/м³, $w=0.413$, $P=751$ мм рт.ст., $\varphi=32\%$, $T=29^\circ\text{C}$; 2 - $\rho=55.3$ кг/м³, $w=0.3417$, $P=756$ мм рт.ст., $\varphi=28\%$, $T=29^\circ\text{C}$; 3 - $\rho=55.3$ кг/м³, $w=0.1733$, $P=757$ мм рт.ст., $\varphi=29\%$, $T=27^\circ\text{C}$; 4 - $\rho=55.3$ кг/м³, $w=0.413$, $P=754$ мм рт.ст., $\varphi=32\%$, $T=29^\circ\text{C}$.

На рис. 2 представлены типичные зависимости убыли массы хвои сосны от времени при различной плотности укладки. Кривые 1 и 2 были получены при одинаковом влагосодержании элементов ЛГМ и одинаковых параметрах окружающей среды. Эти кривые практически совпадают друг с другом и их доверительные интервалы пересекаются во всех точках измерений. Кривая 3 была получена при существенно другом начальном влагосодержании при более высокой температуре воздуха. При этом, доверительные интервалы кривых 1, 2 и 3 пересекаются везде кроме последней точки. Можно сделать вывод, что плотность укладки в указанном диапазоне измерений, получаемая естественным путем, является не существенным фактором, а более сильное

влияние на сушку ЛГМ оказывает начальное влагосодержание ЛГМ, температура окружающей среды и относительная влажность воздуха.

На рис. 3 показаны зависимости убыли массы хвои сосны от времени при различных углах наклона плоскости. Аналогично рис. 1 доверительные интервалы для всех кривых во всех точках пересекаются и можно сделать вывод, что влияние угла наклона плоскости не существенно, а реальное влияние на сушку и форму кривых оказывают начальное влагосодержание ЛГМ, температура воздуха, относительная влажность воздуха и атмосферное давление, которые для всех кривых были различны.

На основе математической модели низкотемпературной сушки слоя ЛГМ [3] исследовано влияние угла наклона земной поверхности и плотности укладки элементов ЛГМ на процесс сушки слоя ЛГМ. В итоге было установлено: 1) изменение плотности укладки, получаемой естественным путем с хаотической ориентацией элементов ЛГМ для процесса сушки не существенно, 2) при условии, что плотность солнечного излучения, дошедшего до поверхности слоя ЛГМ, не зависит от угла наклона земной поверхности или равно нулю, изменение угла наклона земной поверхности не оказывает существенного влияния на процесс сушки ЛГМ.

Из полученных результатов следует, что угол наклона поверхности в условиях данной постановки задачи не существен, а более быстрое высушивание ЛГМ в натуральных условиях на пригорках, вероятно, связано с тем, что на косогорах и холмах плотность растительности меньше, и соответственно, больший поток солнечной радиации доходит до поверхности слоя ЛГМ, что и обуславливает более раннее высушивание слоя ЛГМ. Необходимо также учитывать и угол падения солнечных лучей на поверхность слоя ЛГМ. Кроме того, более раннее таяние снега на пригорках связано еще с отсутствием или меньшим количеством объектов (деревьев, рельефа местности) которые отбрасывают тень и тем самым замедляют таяние снега.

1.4. Экспериментальное исследование испарения капли воды, расположенной на шероховатой поверхности

Для оценки пожарной опасности лесных массивов необходима информация о влагосодержании горючих материалов, прежде всего, хвои, листы, тонких веточек [1]. Известно, что вода может быть связана с материалом химически, физико-химически и физико-механически в виде капель.

В данном параграфе исследуются закономерности испарения капель воды, расположенных на шероховатой поверхности, и как предельный случай, на поверхности отдельно взятых хвоинок сосны, кедра, ели.

В процессе проведения экспериментов определялись масса капель m взвешиванием на аналитических весах с точностью 10^{-4} г., как функция времени t . Для подтверждения достоверности и надежности результатов измерений измерялся объем капель V

$$V = \frac{1}{6}\pi h(h^2 + 3r^2) \quad ,$$

где h , r – высота и радиус капли. Для получения изображения капли на экране, с которого производились измерения h , и r с целью устранения интерференционных явлений использовался шпирен-метод.

Различия в значениях массы капли измеренной m и рассчитанной по формуле

$$m_p = \rho V \quad ,$$

где ρ – плотность жидкости не превышало 6%. Шероховатость поверхностей R_z определялась профилометром 269 с точностью 10^{-10} м. и варьировалась для плоской подложки из оргстекла в пределах $R_z=(0.036\div3.7)\times10^{-6}$ м., для хвои $R_z=(6.1\div60.6)\times10^{-6}$ м. контролировались относительная влажность воздуха $\varphi = p_e/p_*$, где p_e – парциальное давление воды, p_* – давление насыщенного пара, атмосферное давление p , температура T и влагосодержание хвои W .

Показано, что крупные капли воды ($r>5\cdot10^{-3}$ м.) испаряются по закону Герца – Кнудсена [1]

$$(\rho V)_w = \frac{AM(p_* - p_e)}{\sqrt{2\pi MRT}},$$

где A – коэффициент аккомодации, M – молярная масса, R – универсальная газовая постоянная, по величине $A\approx1.8A_0$, где A_0 – коэффициент аккомодации для воды, испаряющейся со свободной поверхности. Скорость испарения $(\rho v)_w$ крупных капель слабо изменяется в зависимости от R_z . Мелкие капли испаряются по закону

$$\frac{m}{m_0} = (1 - 1.08 \cdot 10^{-5} R_z) 0.273 d_0^{-1.426} t,$$

где m_0 , d_0 – начальные значения массы и диаметра капли, t – время в мин.

Обнаружено, что между сухой хвоей и водой в капельном состоянии не происходит массообмена. Живая хвоя впитывает влагу из капли, скорость испарения капли, расположенной на живой хвое, выше скорости испарения капли, расположенной на сухой хвое. Визуализация срезов миделева сечения живой и сухой хвои при 20-ти кратном увеличении показала, что массообмен между каплями и хвоей осуществляется через устьицы. У сухой хвои устьицы атрофированы и влага не поступает из капли в хвою.

2. Математическое моделирование сушки слоя лесных горючих материалов

2.1. Приближенное математическое описание сушки слоя ЛГМ

Наиболее полная и точная математическая модель сушки ЛГМ дана в [3]. В рамках нее учитывается сопряженный тепло- и массообмен между слоем ЛГМ и приземным слоем атмосферы с учетом излучения Солнца и испарения воды в свободном и связанном с ЛГМ состоянии по закону Герца-Кнудсена, а также перенос излучения в самом слое в рамках диффузионного приближения. Недостатком этой постановки является обилие эмпирических констант и функций и большое количество нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Следуя [8], допустим, что: 1) конвективный теплообмен между слоем ЛГМ и приземным слоем атмосферы удовлетворительно описывается с помощью граничных условий третьего рода с использованием известных коэффициентов конвективного теплообмена [8], 2) парциальное давление паров воды в слое ЛГМ пренебрежимо мало по сравнению с давлением насыщенных паров, 3) давление P , температура T и плотность ρ газовой фазы в слое ЛГМ совпадают с соответствующими метеорологическими данными (P_e , T_e и ρ_e) для данного момента времени и данной местности, 4) излучение в слое ЛГМ подчиняется закону Бугера-Ламберта [9], 5) Испарение связанной воды и капелек воды, прилипших к элементам ЛГМ описывается одним и тем же законом Герца-Кнудсена.

В результате для приближенного математического описания сушки слоя ЛГМ имеем следующую систему уравнений [9]

$$\sum_{i=1}^2 \rho_i \varphi_i C_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) - \frac{\partial q_{Rz}}{\partial z} - q_2 \frac{\rho_2 k'_{02}}{\sqrt{T_s}} \varphi_2 \exp \left(-\frac{E}{RT_s} \right) - \alpha_v (T_s - T_e), \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -\frac{k'_{02}}{\sqrt{T_s}} \varphi_2 \exp \left(-\frac{E}{RT_s} \right), \quad (7)$$

$$q_{Rz} = q_{Rw} (1 - \varphi_w) \exp[k_1 \rho_1 (z - h)], \quad (8)$$

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

которую необходимо решать с учетом следующих начальных и граничных условий

$$T_s|_{t=0} = T_{sH}, \quad \varphi_i|_{t=0} = \varphi_{iH}, \quad (10)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=h} = \alpha_e (T_{sw} - T_e) + q_2 R_{2w} - \varphi_w q_{Rw}, \quad (11)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_0 (T_{s0} - T_0) + q_{Rw} (1 - \varphi_w) \exp(-k_1 \rho_1). \quad (12)$$

Здесь z – координата, отсчитываемая от поверхности почвы, перпендикулярно подстилающей поверхности; t – время; T_s – температура конденсированной фазы; λ_s – коэффициент теплопроводности конденсированной фазы в слое ЛГМ; α_e и α_0 – коэффициенты теплообмена на верхней и нижней границах слоя соответственно; T_0 – температура почвы; $\alpha_v = \alpha_e S$ – коэффициент объемного конвективного теплообмена; S – удельная поверхность макропор; ρ_i , C_{pi} , φ_i – плотности, теплоемкости и объемные доли сухого органического вещества ($i=1$), связанной с сухим органическим веществом воды ($i=2$); k'_{02} и E – предэкспоненциальный множитель и энергия активации, характеризующая испарение свободной воды; R – универсальная газовая постоянная; $\varphi_w = \varphi_{1w} + \varphi_{2w}$ – объемная доля конденсированной фазы на верхней границе ЛГМ; q_{Rw} и q_{Rz} – плотности потока результирующего излучения, на границе раздела сред и потока излучения, проникающего в слой ЛГМ; q_2 – теплота испарения единицы массы воды; A – альбедо слоя ЛГМ; $q_R(h)$ – плотность потока излучения от Солнца на верхней границе слоя ЛГМ; α – угол между горизонтальной плоскостью и подстилающей поверхностью; ε_s – коэффициент черноты слоя; σ – постоянная Стефана-Больцмана; J_w – плотность потока длинноволнового излучения на верхней границе слоя ЛГМ; k_1 – коэффициент затухания излучения в слое ЛГМ, индекс w приписывается параметрам состояния при $z=h$.

Приведение к безразмерному виду. Представляет интерес постановка задачи с использованием безразмерных переменных [8, 9]. В результате приведения (6)-(12) к безразмерному виду имеем следующую систему уравнений

$$\begin{aligned} (1 + a\varphi_2) \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} &= \frac{1}{\delta^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[(1 + \pi_\lambda \varphi_2) \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \right] + \bar{q}_{Rw} \exp[\bar{k}_1 (\zeta - 1)] - \\ &- \bar{\alpha}_v (\theta_s - \theta_e) - \frac{\varphi_2}{\sqrt{1 + \beta \theta_s}} \exp \left(\frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s} \right), \quad \theta_s = \frac{(T_s - T_{sH})E}{RT_{sH}^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\varphi_1 = \varphi_{1H}, \frac{\partial \varphi_2}{\partial \tau} = -\frac{\gamma \varphi_2}{\sqrt{1 + \beta \theta_s}} \exp\left(\frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s}\right), \gamma = \frac{\rho_1 \varphi_{1H} C_{pl} R T_{sH}^2}{\rho_2 q_2 E}, \quad (14)$$

которые необходимо решать с учетом следующих начальных и граничных условий

$$\theta_s|_{\tau=0} = 0, \varphi_2|_{\tau=0} = \varphi_{2H}, \quad (15)$$

$$-(1 + \pi_\lambda \varphi_{2w}) \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=1} = Bi(\theta_{sw} - \theta_e) + \frac{b \varphi_{2w}}{\sqrt{1 + \beta \theta_w}} \exp\left(\frac{\theta_{sw}}{1 + \beta \theta_w}\right) -$$

$$-(\varphi_{1H} + \varphi_{2w}) [c - d(1 + \beta \theta_{sw})^4] \theta_e = \frac{(T_e - T_{sH}) E}{R T_{sH}^2}, \quad (16)$$

$$-(1 + \pi_\lambda \varphi_{2w}) \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=0} = Bi_0(\theta_{s0} - \theta_0), \theta_0 = \frac{(T_0 - T_{sH}) E}{R T_{sH}^2}, \quad (17)$$

Здесь и выше $\theta_s, \theta_e, \theta_0$ – безразмерные температуры слоя ЛГМ, окружающей среды и

почвы; $\tau = \frac{t q_2 k'_{02} \rho_2 E}{\rho_1 \varphi_{1H} C_{pl} R T_{sH}^2 \sqrt{T_{sH}}} \exp\left(-\frac{E}{R T_{sH}}\right)$ – безразмерное время; $\zeta = z/h$ –

безразмерная координата; $\delta^2 = \frac{q_2 k'_{02} \rho_2 h^2 E}{\lambda_1 \varphi_{1H} \sqrt{T_{sH}} R T_{sH}^2} \exp\left(-\frac{E}{R T_{sH}}\right)$ – безразмерный

критерий (аналог критерия Д.А. Франк-Каменецкого [3]); $\beta = R T_{sH} / E$ – безразмерная начальная температура слоя; γ – безразмерный критерий подобия, характеризующий скорость сушки слоя ЛГМ; $\pi_\lambda = \lambda_2 \varphi_{2H} / (\lambda_1 \varphi_{1H})$ – относительный коэффициент

теплопроводности воды; $Bi = \frac{\alpha_e h}{\lambda_1 \varphi_{1H}}$ – критерий Био, характеризующий интенсивность

теплообмена слоя ЛГМ с приземным слоем атмосферы; $Bi_0 = \frac{\alpha_0 h}{\lambda_1 \varphi_{1H}}$ – критерии Био,

характеризующий интенсивность теплообмена слоя ЛГМ и почвы;

$$a = \frac{\rho_2 C_{p2}}{\rho_1 C_{pl} \varphi_{1H}}, \quad b = \frac{E q_2 k'_{02} \rho_2 h}{R T_{sH}^2 \sqrt{T_{sH}} \lambda_1 \varphi_{1H}} \exp\left(-\frac{E}{R T_{sH}}\right),$$

$$c = \frac{E h [(1 - A) q_R(h) + J_w] \cos \alpha}{\lambda_1 \varphi_{1H} R T_{sH}^2}, \quad d = \frac{\varepsilon_s \sigma T_{sH}^2 h E}{R \lambda_1 \varphi_{1H}} - \text{безразмерные величины, которые}$$

характеризуют объемную теплоемкость воды, тепловой эффект испарения воды, приток

лучистой энергии и коэффициент черноты слоя; $\bar{\alpha}_v = \frac{\alpha_v R T_{sH}^2 \sqrt{T_{sH}}}{q_2 k'_{02} \rho_2 E} \exp\left(\frac{E}{R T_{sH}}\right),$

$$\bar{q}_{Rw} = \frac{q_{Rw} k_1 \rho_1 \sqrt{T_{sH}}}{q_2 k'_{02} \rho_2 E} \exp\left(\frac{E}{R T_{sH}}\right), \quad \bar{k}_1 = k_1 \rho_1 h - \text{безразмерные значения объемного}$$

коэффициента теплообмена, радиационного теплового потока и коэффициента затухания

излучения; $\lambda_1 \varphi_{1H}$ - теплопроводность сухого органического вещества; $\lambda_2 \varphi_{2H}$ - теплопроводность связанной с сухим органическим веществом воды.

Численное решение нелинейной краевой задачи (13)-(17). Для численного решения системы уравнений (13)-(14) с граничными и начальными условиями (15)-(17) был использован итерационно-интерполяционный метод [10]. При $\rho_1=300 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2=1000 \text{ кг/м}^3$, $k_{02}=6,03 \cdot 10^5 \text{ К}^{1/2}/\text{с}$, $A=0.12$, $\varepsilon_\sigma=0.7$, $E/R=5956 \text{ К}^{-1}$, $R=8.314 \text{ Дж/К}$, $a=0.55$, $q_2=2250 \text{ Дж/кг}$, $C_{p2}=4180 \text{ Дж/(кгК)}$, $P_e=1.01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и различных значений температуры окружающей среды $T_e=306 \text{ К}$ и $T_e=300 \text{ К}$. Известно [5], что критическое влагосодержание слоя ЛГМ из опада хвойнок и тонких веточек сосны равно $\varphi_*=0.13$.

Как показывает анализ результатов численных расчетов (см. рис.1, 2, 3) объемная доля воды в связанном состоянии с сухим органическим веществом с ростом z убывает и достигает минимального значения на верхней границе слоя лесных горючих материалов, что согласуется с данными наблюдений.

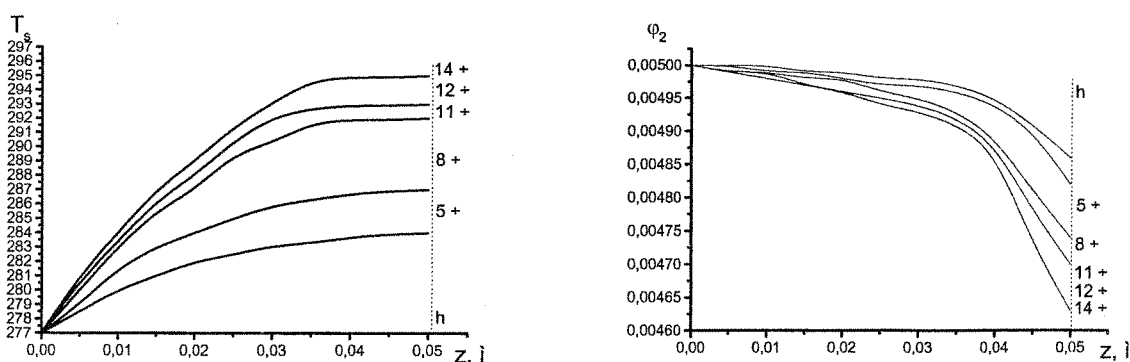


Рис. 1. Изменение T_s и φ_2 при изменении $q_R(h)$ в зависимости от угла падения солнечных лучей. $q_R(h)=q_R \cdot (1-\cos \alpha)$.

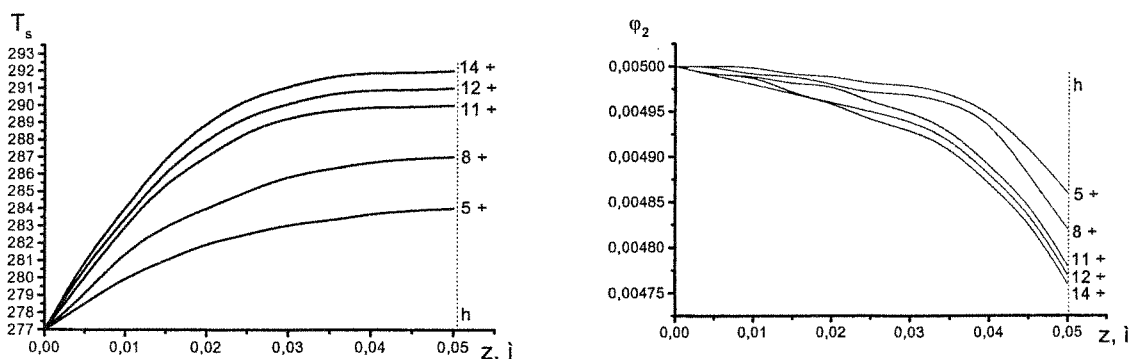


Рис. 2. Изменение T_s и φ_2 без учета зависимости $q_R(h)$ от угла падения солнечных лучей.

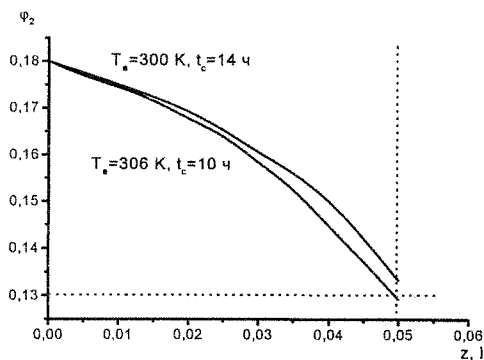


Рис. 3. Изменение φ_2 внутри слоя ЛГМ при $T_c=300$ K через 14 ч сушки и при $T_c=306$ K через 10 ч сушки.

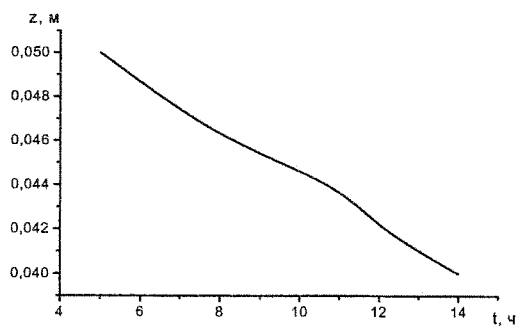


Рис. 4. Зависимость координаты z^* , при которой в данный момент времени достигается влагосодержание $\varphi_2 = \frac{\varphi_{2*}}{2}$. $T_c=300$ K.

На рис. 4 показана скорость сушки внутри слоя ЛГМ. По оси абсцисс отложено время, за которое φ_2 достигло значения $\varphi_{2*}/2$, а по оси ординат – расстояние от нижней границы слоя ЛГМ.

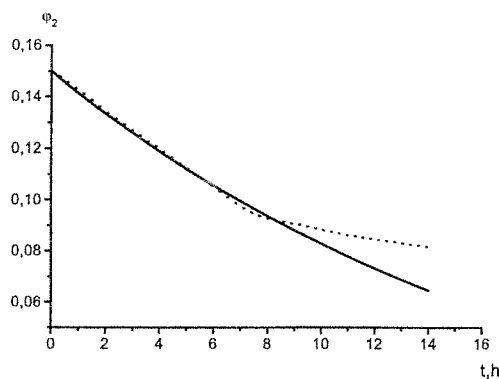
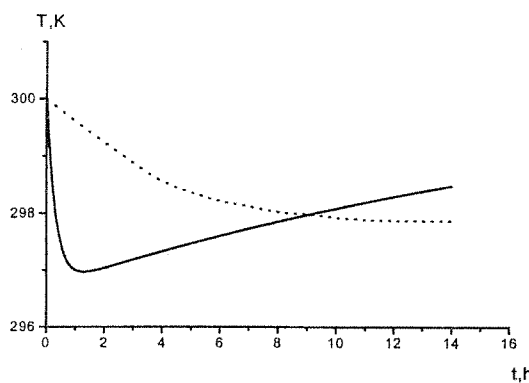


Рис. 5. Сравнение с результатами, полученными на основе решения системы уравнений из [6] при $T_e=T_sH=300$ K, $\varphi_{2H}=0.15$, $h=0.1$, $Q_{rw}=0$.

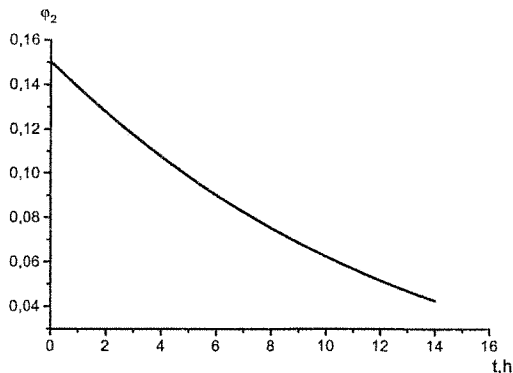
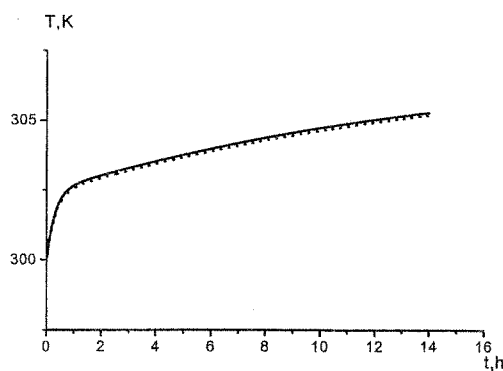


Рис. 6. Сравнение с результатами, полученными на основе системы уравнений из [6] при $T_e=T_sH=300$ K, $\varphi_{2H}=0.15$, $h=0.1$, $Q_{rw}=3.988E+4$.

На рис. 5, 6 приведено сравнение с результатами работы [11], где пунктиром изображено численное решение нелинейной краевой задачи (12)-(17) при $z=h/2$, а сплошной линией – результаты, полученные на основе системы уравнений из [11]. Кривые для φ_2 на рис.6 практически совпадают.

2.2. Аналитическое и численное решение задачи о сушке слоя ЛГМ

В данной работе дается уточнение постановки задачи, предложенной в [9], в рамках которого учитывается тот факт, что одной из движущейся силой процесса сушки является разность насыщенного и парциального давлений паров воды.

В теории теплового взрыва был предложен метод осреднения уравнений теплового взрыва, в результате чего вместо уравнений в частных производных решение задачи о воспламенении сводится к решению обыкновенных дифференциальных уравнений, где аргументом является время [12]. Математическое обоснование этого приближенного метода решения нелинейных начально-краевых задач математической физики дано в монографии [13].

В результате интегрирования уравнений [9] по ζ от 0 до 1 с учетом граничных условий получаем обыкновенные дифференциальные уравнения для средней по слою ЛГМ безразмерной температуры θ_s и безразмерного объемного влагосодержания слоя φ_2

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial \tau} = -\frac{\gamma \varphi_2}{\sqrt{1 + \beta \theta_s}} \left[1 - \pi_e \exp\left(-\frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s}\right) \right] \exp \frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (1 + a \varphi_2) \frac{d\theta_s}{d\tau} = & \frac{1}{\delta^2} \left\{ -Bi(\theta_s - \theta_e) - \frac{b\varphi_2}{\sqrt{1 + \beta \theta_s}} \left[1 - \pi_e \exp\left(-\frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s}\right) \right] \exp \frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s} + \right. \\ & + (\varphi_{1H} + \varphi_2) \left[c - d(1 + \beta \theta_s)^4 \right] - Bi_0(\theta_s - \theta_0) - (\varphi_{1H} + \varphi_2) \left[c_0 - d_0(1 + \beta \theta_s)^4 \right] \left. \right\} + \\ & + \frac{q_{RW}}{\bar{k}_l} (1 - \exp(-\bar{k}_l)) - \alpha_v(\theta_s - \theta_e) - \frac{\varphi_2}{\sqrt{1 + \beta \theta_s}} \left[1 - \pi_e \exp\left(-\frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s}\right) \right] \exp \frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\varphi_2|_{\tau=0} = \varphi_{2H}, \quad \theta_s|_{\tau=0} = 0, \quad (20)$$

Здесь $\delta, \beta, Bi, Bi_0, a, b, c, d, c_0, d_0, \bar{\alpha}_v, \bar{k}_l, \varphi_{1H}$ - безразмерные критерии подобия, а π_e - относительная влажность воздуха.

Используя метод частичного разделения переменных [14], в результате интегрирования (18) с учетом первого условия (20) получаем

$$\varphi_2 = \varphi_{2H} \exp(I(\tau)), \quad \text{где } I(\tau) = -\gamma \int_0^\tau \frac{\left[1 - \pi_e \exp\left(-\frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s}\right) \right]}{\sqrt{1 + \beta \theta_s}} \exp\left(\frac{\theta_s}{1 + \beta \theta_s}\right) d\tau. \quad (21)$$

Для приближенного вычисления интеграла $I(\tau)$ целесообразно использовать разложение в ряд по τ в окрестности $\tau = 0$. Это позволит найти безразмерное время сушки слоя τ_* . Если использовать два члена ряда Тейлора для подынтегральной функции, то в результате вычислений получаем следующее выражение для безразмерного времени сушки τ_* во втором приближении

$$\tau_* = \frac{\sqrt{(1 - \pi_{e0})^2 + 2\{\theta'_{s0} - \pi_{e0}\} \frac{1}{\gamma} \ln \frac{\varphi_{2H}}{\varphi_{2*}} - (1 - \pi_{e0})}}{\{\theta'_{s0} - \pi'_{e0}\}}, \text{ где } \pi'_{e0} = \left. \frac{d\pi_e(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0}, \theta'_{s0} = \left. \frac{d\theta_s(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0} \quad (22)$$

Размерное время сушки в этом случае имеет вид

$$t_* = \frac{\tau_{*2} \rho_1 \varphi_{1H} C_{p1} R T_{s*}^{5/2}}{q_2 k'_{02} \rho_2 E} \exp\left(\frac{E}{R T_{s*}}\right). \quad (23)$$

Кроме того, решение задачи Коши (1)-(3) с соответствующими начальными условиями осуществлялось на основе метода Рунге-Куты 4-го порядка точности. Найден коэффициент, повышающий точность аналитической формулы. Результаты сравнения аналитических (без коэффициента и с коэффициентом) и численных результатов для времени сушки слоя ЛГМ при $\pi'_e = 0$ представлены в таблице.

Высота слоя ЛГМ, h	Температура внешней среды и сухого органического вещества	$\varphi_{2H} = 0.15$ t_*, t_{*1}, t_q , ч	$\varphi_{2H} = 0.19$ t_*, t_{*1}, t_q , ч	$\varphi_{2H} = 0.21$ t_*, t_{*1}, t_q , ч
0.1м	$T_e=300$ К, $T_{sH}=300$ К	1.47; 1.75; 1.78	3.59; 4.30; 3.75	4.71; 5.64; 5.80
	$T_e=306$ К, $T_{sH}=306$ К	0.97; 1.16; 1.38	2.27; 2.72; 2.98	2.90; 3.47; 3.81
	$T_e=306$ К, $T_{sH}=300$ К	1.40; 1.68; 1.74	3.36; 4.02; 4.62	4.35; 5.20; 5.90
0.15м	$T_e=300$ К, $T_{sH}=300$ К	1.34; 1.61; 1.59	3.04; 3.65; 4.11	3.81; 4.56; 5.22
	$T_e=306$ К, $T_{sH}=306$ К	0.91; 1.08; 1.01	2.03; 2.42; 2.51	2.50; 3.00; 3.18
	$T_e=306$ К, $T_{sH}=300$ К	1.31; 1.57; 1.55	2.95; 3.53; 4.01	3.68; 4.40; 5.09
0.2м	$T_e=300$ К, $T_{sH}=300$ К	1.30; 1.55; 1.47	2.86; 3.42; 3.63	3.53; 4.23; 4.59
	$T_e=306$ К, $T_{sH}=306$ К	0.88; 1.05; 0.94	1.93; 2.31; 2.21	2.37; 2.83; 2.76
	$T_e=306$ К, $T_{sH}=300$ К	1.28; 1.53; 1.44	2.80; 3.35; 3.56	3.46; 4.13; 4.49

Из анализа результатов расчетов следует, что аналитическое решение, полученное на основе формулы (23) при $\pi_e = const$ хорошо согласуется с численным решением задачи Коши (18)-(20). Этот результат объясняется тем, что в формуле (23) учтено влияние второго слагаемого при разложении в ряд Тейлора подинтегральной функции. Поправочный коэффициент позволяет понизить среднюю относительную погрешность с 19.7% до 7.1%.

Таким образом, формулу (23) можно использовать для определения времени сушки при прогнозе лесной пожарной опасности.

Литература:

1. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. - Новосибирск: Наука, 1992.
2. Сухинин А.И. Система космического мониторинга лесных пожаров в Красноярском крае // Сибирский экологический журнал, 1996, Т.3, №1.
3. Постановка и решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов/ А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Л.Ю. Катаева, Е.Л. Лобода // Физика горения и взрыва, 2001, Т.37, №1.
4. Тейлор Х.С. Физическая химия. - Л.: ОНТИ, 1935.

5. Кинетика неравновесной сушки некоторых лесных горючих материалов/ А.М. Гришин, В.Е. Абалтусов, В.Г. Зверев и др. // Физика горения и методы ее исследования. - Чебоксары, 1981.
6. Белихмайер Я.А., Смолянинова Н.М., Смолянинов С.И. Техника эксперимента: Уч. пособие. - Томск: Изд-во ТПИ, 1983.
7. Кошлин В.Б., Сеницын С.П. Определение эффективных кинетических постоянных пиролиза хвои сосны// Механика реагирующих сред и ее приложения. - Новосибирск: Наука, 1989.
8. Седов Л.И. Механика сплошных сред, Т.1. - М.: Наука, 1973.
9. Гришин А.М., Катаева Л.Ю., Лобода Е.Л. Математическое моделирование сушки слоя лесных горючих материалов // Вычислительные технологии, Т.6, Ч.2, 2001.
10. Гришин А.М., Берцун В.Н., Зинченко В.И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. - Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1980.
11. Аналитическое и численное решение задачи о сушке слоя ЛГМ./ А.М. Гришин, Н.В. Барановский, И.В. Мейнерт, Ю.Ю. Павшук // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия: Материалы 4-й международной конференции. - Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2001.
12. Тодес О.М. Теория теплового взрыва. Тепловой взрыв для реакции нулевого порядка // Журнал физической химии, 1939, Т. 8, Вып. 11.
13. Вольперт А.И., Худяев С.И. Анализ в классах разрывных функций и уравнений математической физики. - М.: Наука, 1975.
14. Алексеев Б.В., Гришин А.М. Введение в аэротермохимию. - Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1978.

УДК 621.18.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ЦКС

В.В. Саломатов, А.В. Волков^{*}, А.Д. Рычков^{}**

^{*} - Институт теплофизики СО РАН г. Новосибирск

^{} - Институт вычислительных технологий г. Новосибирск**

E-mail: aleks@itp.nsk.ru

Тенденции развития энергетического комплекса Сибирского региона, в частности, все более ужесточающиеся экологические требования и стремление регионов стать самообеспечивающимися по источникам ископаемого топлива, ставят перед энергетикой вопрос о новых способах сжигания угля и других низкокачественных топлив.

Технология сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) обладает следующими достоинствами. При подаче в топку известняка в пропорции 2,5-3,5 к сере топлива выход SO_2 снижается на 90-95 % в зависимости от вида топлива. Низкая температура горения порядка 800-850 °С по сравнению с 1100-1500 °С в пылеугольных топках, согласно теории образования NO_x Я.Б. Зельдовича, существенно препятствует образованию оксидов азота из подаваемого в зону горения воздуха. Зольность топлива может достигать 70-80 %, допустимо высокое содержание серы топлива. При этом без больших расходов (в основном на приобретение сорбента, обычно известняка)