

УДК 536.3

**В.Р. СОБОЛЬ<sup>1</sup>, П.Н. ГОМАН<sup>2</sup>, В.Ч. КРУПЛЕВИЧ<sup>3</sup>, Ю.С. КЕДИЧ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Минск, БГПУ им. М.Танка

<sup>2</sup>Минск, КИИ МЧС Республики Беларусь

<sup>3</sup>Минск, БГАТУ

## **О ТЕМПЕРАТУРНОМ ГРАДИЕНТЕ В ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Введение в проблему.** Задача выявления эффективных мер противодействия распространению огня в лесу остается актуальной, поскольку с общим потеплением климата протяженность жарких периодов в летние месяцы отнюдь не сокращается. Повышение температуры при низкой влажности воздуха способствует доведению напочвенного материала в лесу до состояния интенсивного горения, что приводит к быстрому распространению огня на значительные площади. Существенно, что на широтах Беларуси, России значительное количество пожаров распространяется по нижнему ярусу леса и только около 20 % из них трансформируются в верховые. Мох, лишайник, опад хвои сосны, ели, листвы, включая древесные фрагменты веток, являются одним из основных проводников огня с одной стороны, а также формируют протяженные тепловые фронты, действующие как излучающие источники. В результате пассивные средства защиты в виде противопожарных барьеров, зачастую оказываются не способными предотвратить распространение огня, поскольку при большом запасе выгораемого напочвенного материала лучистые потоки от низовых пожаров могут достигать уровней 1–5 кВт/м<sup>2</sup> и более.

В целом, быстрота возгорания напочвенного покрова зависит от нескольких факторов, к которым относятся исходная влажность, плотность и способность накапливать и проводить тепло. В наличествующих литературных источниках отсутствуют данные по характеру формирования температурного фронта и скорости прогревания и высыхания наземного слоя под действием радиационных потоков энергии [1–4]. В работе представлены результаты исследования процесса разогрева слоя растительного материала леса типа мох при его облучении интенсивным лучистым потоком, который имитирует действие излучения от пламени лесного пожара на участок расположенный за противопожарным барьером. Рассматриваются временные характеристики разогревания испытываемого материала в зависимости от состояния его влажности, плотности, тепловых свойств.

**Методы и результаты исследования, обсуждение.** Тепловые поля в упомянутых материалах исследованы методом экспериментального моделирования распределения температуры  $T$  по глубине образца при одностороннем обогреве лучистым потоком  $q$  одной из его поверхностей. Анализ осуществлен на основе нестационарного уравнения теплопереноса. Эксперимент позволил установить закономерности нарастания температуры в среде в составе материалов типа опад хвои сосны и ели, лишайник, мох, при варьировании параметров влажности и плотности в диапазоне значений, характерных для условий естественного накопления в лесных массивах страны в южных и средних широтах. Численный анализ дополнил эксперимент, обобщив данные по накоплению тепла в материале и его высыханию на более широкий спектр параметров по интенсивности излучения  $q$ , толщине обогреваемого слоя, условиям связи с окружающей средой.

В эксперименте использована установка для испытаний на воспламеняемость веществ и материалов, позволяющая, в том числе, оценить условия прогревания образца и его тепловое состояние посредством считывания данных о температуре с внедренных в объем термодатчиков преобразователей. В общем виде лабораторный комплекс включает радиационную панель в форме усеченного конуса, обеспечивающую воздействие заданной интенсивности в центре лицевой поверхности образца, а также передвижную платформу для расположения испытуемого материала и его перемещения в область обогрева. Условия контакта неосвещаемой стороны плоского образца в форме диска с толщиной 3 см и диаметром 15 см отвечали его нахождению на грунте влажностью  $w$  около 10 % [5].

В ходе измерений установлено, что способность упомянутых компонент почвенного покрова аккумулировать тепло зависит в большей степени от их влажности и плотности, чем от вида, что объясняется их общей органической природой. Разбежки в значениях  $T$  в испытуемых материалах при потоке  $q$  в 5–15 кВт/м<sup>2</sup> составляют до 10 К. В дальнейшем закономерности формирования температурного поля представлены на примере свойств мха, как модельной среды отображающей процесс прогрева в наиболее широких пределах изменения плотности и влажности.

Распределение температурного поля  $T(x)$  по слою мха при воздействии потока  $q$  интенсивностью в 5 кВт/м<sup>2</sup> (рис. 1) характеризуется возрастанием температурного градиента  $dT/dx$  в приповерхностной области. В начальный период времени прирост  $T$  несколько замедлен и по истечении 5 мин на глубине 0,005 м от верхней грани составляет около 30 К, против 75 К после 15 мин. При этом воздействие  $q$  в течение 2 мин приводит к прогреву лишь до глубины порядка 0,015 м. Даже продолжительный обогрев не способствует существенному росту  $T$  тыльной стороны. В подтверждение этому по истечении 15 мин прирост температуры в точке  $x = 0,025$  м соста-

вил лишь 20 К, что свидетельствует о плохой передаче тепла. Условия передачи тепловой энергии вглубь среды в значительной степени определяются плотностью материала  $\rho$ , что отражено на зависимостях температурного роста в функции времени  $T(t)$  (рис. 2).

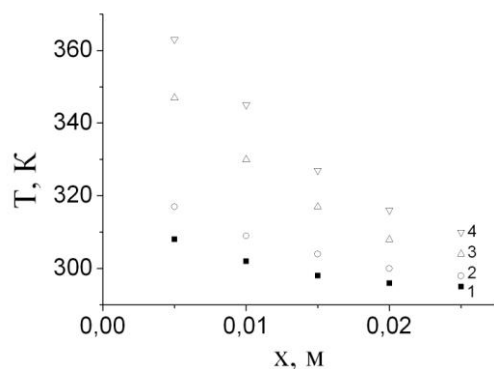


Рисунок 1 – Распределение температурного поля по слою мха толщиной ( $D$ ) 0,03 м, плотностью ( $\rho$ ) 50 кг/м<sup>3</sup> и влажностью ( $w$ ) 10 % при воздействии плотности лучистого теплового потока ( $q$ ) 5 кВт/м<sup>2</sup> в момент времени ( $t$ ), мин: 2 (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4)

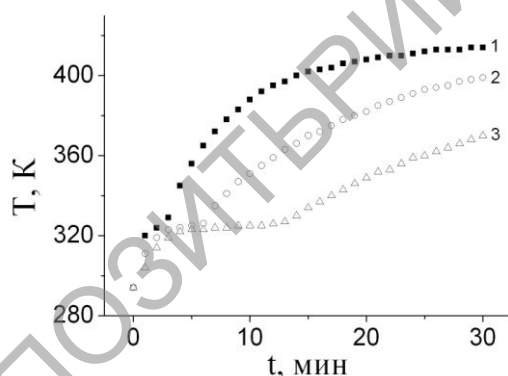


Рисунок 2 – Динамика формирования температуры в приповерхностной области в слое мха ( $x = 0,005$  м) толщиной ( $D$ ) 0,03 м при влажности ( $w$ ) 40 % под воздействием лучистой энергии ( $q$ ) интенсивностью 5 кВт/м<sup>2</sup> при плотности мха ( $\rho$ ), кг/м<sup>3</sup>: 25 (1), 50 (2), 75 (3)

Из рис. 2 следует, что при увеличении  $\rho$  рост  $T$  в приповерхностной области замедляется. На первоначальной стадии поступающая энергия расходуется на высвобождение абсорбированной воды, которой тем больше, чем выше  $\rho$ . Для более плотной среды время экспозиции, требуемое для извлечения влаги, выше. После участка с малым приростом  $T$ , напоминающим фазовый переход, на зависимостях  $T(t)$  обнаруживается рост, который тем сильнее, чем меньше  $\rho$ . Вероятно, процесс испарения влаги приводит к частичному эффективному разрыхлению среды, что также сказывается на его восприимчивости к обогреву. Следует отметить, что влажность  $w$ , как параметр состояния среды, также сложным образом воздействует на динамику формирования температуры по объему (рис. 3). Из

эксперимента следует, что образцы с  $w$  около 10 % прогреваются хуже всего, что отвечает меньшей перколяции тепла через воздушную составляющую среды при той же плотности. При этом в приповерхностной области ( $x \leq 0,015$  м) при  $w$  от 40 % в течение рассматриваемого времени влияние облучения с  $q$  в  $5 \text{ кВт/м}^2$  вообще перестает сказываться.

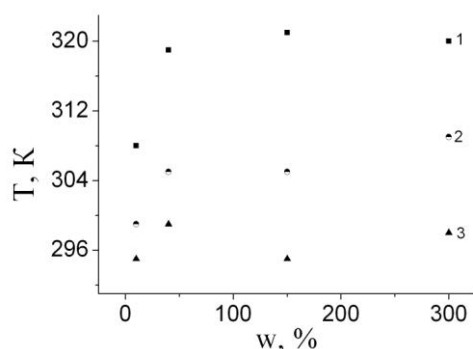


Рисунок 3 – Зависимость температуры в слое мха плотностью ( $\rho$ )  $50 \text{ кг/м}^3$  от его влажности при воздействии лучистого теплового потока ( $q$ ) интенсивностью  $5 \text{ кВт/м}^2$  в течение 2 мин на глубине ( $x$ ), м: 0,005 (1), 0,015 (2), 0,025 (3)

Наличие участка с выходом  $T$  на значение, близкое к постоянному, означает тепловое насыщение, когда в состоянии термодинамического равновесия приходящая в данную точку энергия выводится из нее за счет потерь на излучение, теплопроводность и т.д. Связь с окружением можно описать феноменологическим коэффициентом теплоотдачи  $k$ . Пренебрегая пространственным изменением  $T$  в толщине элементарного слоя, запишем уравнение диффузии с учетом теплоотвода в приближении его линейной зависимости от перепада температур

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \frac{q}{D} - k\lambda \frac{T - T_o}{D^2}, \quad (1)$$

Здесь  $c$  и  $\lambda$  – теплоемкость и теплопроводность материала образца. Первый член в правой части (1) описывает объемную плотность приходящей энергии, а второе слагаемое – теплоотвод из объема. Безразмерный коэффициент  $k$  характеризует условия теплоотвода. Решение (1) можно представить

$$T = \frac{qD}{k\lambda} \left[ 1 - e^{-\frac{k\lambda t}{c\rho D^2}} \right] + T_o, \quad (2)$$

Полученное решение (2) отвечает результатам эксперимента для слоя мха, имеющего параметры ( $D = 0,03$  м,  $\rho = 75 \text{ кг/м}^3$ ,  $c = 3000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) при значениях коэффициента теплоотвода  $k = 25$  и  $30$  для  $q = 5$  и  $10 \text{ кВт/м}^2$  соответственно (рис. 4).

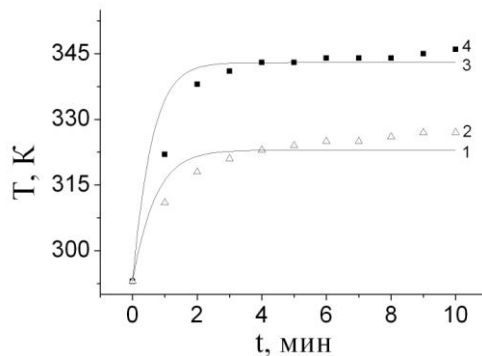


Рисунок 4 – Зависимость температуры в функции времени в приповерхностном слое мха влажностью 150 % по данным эксперимента и расчета при  $q$ , кВт/м<sup>2</sup>: 5 (1, 2), 10 (3, 4). Символы – эксперимент, кривые – расчет

Таким образом, выявленный характер распределения температуры по толщине слоя мха в зависимости от его плотности и влажности, а также временной закон возрастания температуры в каждой точке позволяют представлять процесс поглощения тепловой энергии в приближении интенсивного обмена аккумулированной теплоты с окружающей средой. Режим динамического равновесия в зависимости от уровня плотности и влажности достигается на промежутках времени 6 – 20 мин при эффективном поглощении потока интенсивности 5 кВт/м<sup>2</sup> слоем мшистой подстилки толщиной порядка 3 см.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усеня, В.В. Лесоводственно-пирологические основы охраны лесов от пожаров Республики Беларусь: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.03 / В.В. Усеня. – Гомель, 2003. – 284 с.
2. Гришин, А.М. Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии / А.М. Гришин [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2002. – № 1. – С. 30–35.
3. Валуев, В.Е. Современные подходы к оценке температурных воздействий на конструкции зданий и сооружений / В.Е. Валуев, О.П. Мешик // Вестник Бр.ГТУ. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэн-ка и геоэк-гия. – 2010. – № 2. – С. 62–65.
4. Еналеев, Р.Ш. Огнестойкость элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве / Р.Ш. Еналеев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 5. – С. 48–53.
5. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость: ГОСТ 30402–96. – Введ. 30.04.97. – Минск: Межгос. научно-техн. комиссия по стандартиз., технич. нормир. и сертиф. в строит-ве, 1996. – 31 с.