

1. *Berry G. D., Pasternak A. D., Rambach G. D., Smith J. R., and Schock R. N.* Hydrogen as a future transportation fuel // *Energy*. 1996. Vol. 21, No. 4. Pp. 289–303.
2. *Ogden J. M., Steinbugler M. M., Kreutz T. G.* A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development // *J. of Power Sources*. 1999. Vol. 79. Pp. 143–168.
3. *Ассад М. С., Лежечвич В. В., Миронов В. Н., Пенязьков О. Г., Севрук К. Л.* Горение модифицированных топлив в модели камеры сгорания ДВС / Сборник научных трудов «Тепло— и массоперенос» Института тепло— и массообмена им. А. В. Лыкова НАН РБ— Минск, 2005. — с. 100—105.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА НАПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ ЛЕСА СОСНОВОЙ ФОРМАЦИИ

В.Р.Соболь, П.Н.Гоман, Г.И.Касперов,

Проблема защиты сельскохозяйственных угодий и лесных насаждений от пожаров входит в общий комплекс вопросов, требуемых разрешения для улучшения экологии и обеспечения экономической безопасности страны. Лесные массивы являются источником доступного и сравнительно дешевого энергетического сырья, освоение которого позволит существенно разрешить проблему компенсации и импортозамещения углеводородных энергетических носителей. Вместе с тем лесное и сельское хозяйство несут ощутимые потери от недостаточного рационального обустройства пожароопасных территорий. В этой связи ограничение распространения очагов возгорания, их активная и пассивная локализация при случайном возникновении является весьма актуальной задачей, поскольку в засушливые годы огонь может охватывать значительные площади. Вследствие этого наносится материальный ущерб как непосредственно в период горения и тления, так и косвенно через снижение водорегулирующей, почвозащитной, полезной, санитарно—гигиенической, эстетической и климатической роли леса. Не должная организация системы профилактики сельхозугодий и лесных массивов от распространения огня приводит к тяжелым последствиям, примером чему является обстановка в Греции, где огнем нанесен ущерб в несколько миллиардов долларов.

В сообщении представлены результаты общего анализа проблемы противопожарного обустройства сельскохозяйственных и лесных угодий. С учетом существующего опыта и данных литературных источников обсуждаются возможные мероприятия в плане организации так называемых противопожарных разрывов, позволяющих существенно снизить вероятность распространения огня в некоторых типах лесных насаждений. На основе лабораторного эксперимента и численного оценочного расчета определены значения плотности потока лучистой энергии, приводящие к воспламенению некоторых типов лесного горючего материала в зависимости от времени экспозиции.

Как показывает практика, основным, наиболее доступным и сравнительно недорогим способом повышения устойчивости лесов к распространению низового огня является создание так называемых минерализованных полос, которые представляют собой участки, очищенные от растительности до невосприимчивого к огню минерального слоя [1, 2]. В настоящее время противопожарные минерализованные полосы прокладываются с помощью лесного плуга ПКЛ—70 А, который позволяет устраивать их шириной 1,4 м. По поводу обеспечиваемой ширины упомянутой полосы существуют противоречивые мнения, касающиеся ее действенности для различных типов горения и распространения огня. Действительно, по результатам исследования, проведенного сотрудниками Института леса НАН Беларуси, установлено, что ширина полосы около полутора метров не может явиться эффективной преградой для огня в целом ряде случаев, включая распространение низовых пожаров. Основания для подобной дискуссии весомы, поскольку в зависимости от географической зоны и климата лесные насаждения существенно различаются по целому ряду параметров. К таким параметрам относятся группы по возрасту лесных массивов — спелые и перестойные, средневозрастные, молодняки, приспевающие. Кроме этого леса различаются по породному составу, к которому относятся хвойные, лиственные, смешанные. Зависит интенсивность распространения огня и от типа фитоценоза — мшистого, верескового, черничного, кисличного и др. Соответственно, объем устраиваемых в лесном фонде минерализованных полос и их количественные показатели должны быть определены с учетом как перечисленных, так и других лесорастительных условий, включая класс природной пожарной опасности насаждений.

В последнее время принято считать, что наряду с такими факторами распространения огня в лесу как теплопроводность и конвекция через воздушную среду, важной составляющей передачи энергии является лучистый тепловой поток. В неравновесных условиях поток тепла распространяется от тел имеющих более высокую температуру и поглощаясь объектами разогревает их до тех пор пока не наступит динамическое равновесие [3 — 5]. Для определения этой компоненты передачи тепла можно в первом приближении применить закон Стефана—Больцмана. Используя значение температуры поверхности пламени с учетом поправочного коэффициента на отклонение испускаемого спектра от спектра абсолютно черного тела, можно, в принципе, получить численные значения плотности потока энергии, испускаемого нагретым телом, в том числе и поверхностью пламени определенной формы, требуемого для возгорания напочвенного покрова. Однако указанный метод расчета наиболее удобен для геометрии теплового источника с высокой симметрией — сфера, длинный

цилиндр, бесконечная плоскость – при известных тепловых характеристиках воспламеняемого материала. Для ограниченного плоского теплового источника расчет также возможен, но результат целесообразно сопоставлять с данными эксперимента.

Если требуется установить закономерности воспламеняемости того или другого материала в зависимости от плотности теплового потока, то удобно моделировать процесс в приближении плоского фронта тепловой волны, падающей на поверхность испытуемого образца. В этой связи, в настоящем случае при определении зависимости времени, требуемого для воспламенения некоторых видов напочвенного горючего материала от плотности теплового потока применен метод экспериментального моделирования. Использована установка для испытаний на воспламеняемость, схема которой позволила имитировать воздействие лучистого теплового потока с плоским фронтом на испытуемые образцы из некоторых типов лесного горючего материала хвойных пород. Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 30402–96 (Рис. 1) [3–6].

Варьируя величину плотности теплового потока в широком диапазоне значений и регистрируя время, требуемое для воспламенения образцов горючего напочвенного материала, были установлены закономерности изменения плотности теплового потока в зависимости от времени экспозиции. Поведение кривых по виду напоминает гиперболы. Установлено, что воспламенение напочвенного покрова сосняков мшистого, верескового и черничника при плотности теплового потока происходит за периоды около 200, 350 и 500 секунд соответственно.

Существенно, что величина плотности потока тепла в два раза большая, т.е. 40 кВт/м^2 сокращает длительность экспозиции, необходимой для воспламенения, примерно на порядок. Анализируя полученные результаты необходимо отметить, что плотность потока энергии 20 кВт/м^2 достаточно велика по обычным меркам, а именно она на два порядка превышает плотность потока энергии от Солнца на наших широтах и в двадцать раз больше потока на орбите Земли вне действия атмосферы. Между тем получить в условиях Земли подобную плотность вполне реально. Так, к примеру, сферическая поверхность с температурой около 1000 К и радиусом 1 м в приближении спектра абсолютно черного тела дает плотность потока 20 кВт/м^2 на расстоянии всего около $1,5 \text{ м}$. Естественно коротковолновая ультрафиолетовая часть излучения интенсивно поглощается атмосферой, но на таких малых расстояниях влияние этого поглощения невелико и им вполне можно пренебречь, так что приведенная оценка остается в силе.

Таким образом потоки энергии с плотностью порядка $1000 - 20000 \text{ Вт/м}^2$ являются вполне достижимыми при горении большого количества напочвенного материала. В этой связи разделение лесных угодий на участки с помощью минерализованных полос шириной от четырех и более метров может явиться подходящей мерой профилактики распространения огня посредством локализации очагов в ограниченных областях.

Достаточно значительные временные интервалы, требуемые для воспламенения напочвенного покрова и распространения низового пожара, можно объяснить присутствием влаги в испытуемом материале. В соответствии с законами сохранения лучистая энергия любого источника при падении на поверхность тела претерпевает отражение, поглощение и частично проходит через среду. Чтобы поглощающий

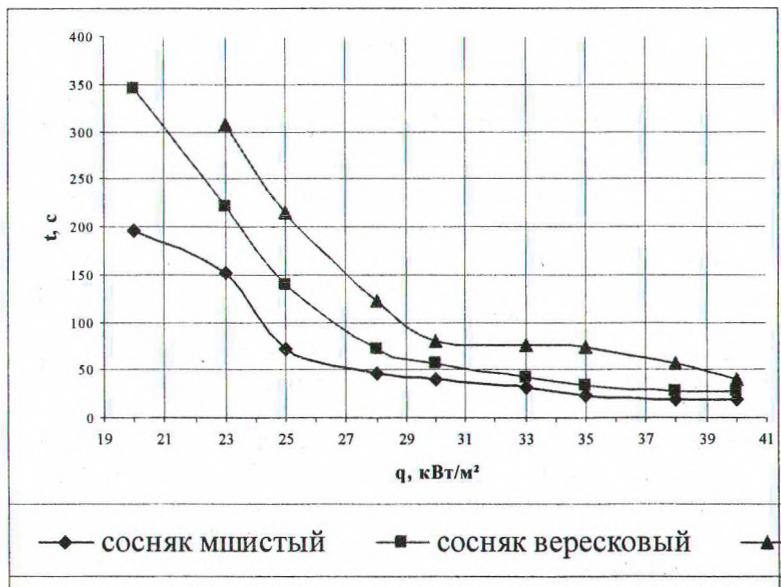


Рис. 3. Время, требуемое для воспламенения некоторых видов напочвенного покрова в зависимости от плотности теплового потока.

тепловую энергию материал нагревался не слишком сильно, он должен иметь сравнительно большую теплоемкость. Вода, входящая в состав напочвенного покрова существенно повышает общую теплоемкость, не позволяя интенсивно прогреться объему, до полного обезвоживания. Немаловажен для оценки состояния материала, его устойчивости к возгоранию и такой фактор как теплопроводность. При сравнительно высокой теплопроводности прогревание идет по всему объему. В противном случае тепло плохо распространяется и концентрируется в поверхностном слое.

Тепловое состояние материалов можно оценить с помощью нестационарного уравнения диффузии, которое обычно замыкают граничными условиями [7, 8]. В реальном приближении для оценки уровня разогрева жидкостной составляющей в горючем материале применимо нестационарное уравнение теплопроводности. Для этого рассмотрим характер возрастания температуры в слое воды, находящемся на теплоизолирующей подложке. Для простоты решим одномерную задачу, по условиям которой поверхностью воды поглощается определенный поток энергии. Чтобы не использовать уравнение диффузии в частных производных по временной и пространственной координатам, которое в строгом рассмотрении дополняется краевыми и начальными условиями, введем краевое условие непосредственно в уравнение, предполагая, что для малой толщины водяного слоя распределение температуры по толщине близко к однородному. Таким образом, одномерное уравнение временной зависимости температуры превращается в дифференциальное уравнение первого порядка с положительным и отрицательным тепловым источником, у которого градиент выбирается как линейная функция разности температур вдоль изолирующего слоя

$$Lc\rho \frac{\partial T}{\partial t} = q - \lambda \frac{T - T_0}{d} \quad (1)$$

здесь c и ρ — удельная теплоемкость и плотность воды,

L — толщина водяного слоя,

λ и d — теплопроводность и толщина слоя изолирующего материала, q — плотность поглощаемого теплового потока, T_0 — температура окружающей среды.

Отыскивая решение (1) в виде суммы общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного и определяя константу интегрирования из начального условия, — то есть при $t = 0$ температура воды равна температуре окружающей среды, — получаем решение в виде

$$T(t) = \frac{qd}{\lambda} \left(1 - e^{-\frac{\lambda}{d\rho c L} t} \right) - T_0 \left(1 - 2e^{-\frac{\lambda}{d\rho c L} t} \right) \quad (2)$$

Решение (2) показывает, что в целом температура изменяется по экспоненциальному закону. При малых значениях теплопроводности изолятора, как легко убедиться, удержание первых не исчезающих членов в разложении экспоненты позволяет представить закон изменения температуры как линейную аппроксиманту по времени

$$T(t) = T_0 + qt/Lc\rho.$$

В соответствии с полученным решением (2) на Рис. 2 смоделирована кинетика изменения температуры слоя воды толщиной 10^{-3} м при эффективном поглощении мощности 100 Вт при некоторых значениях толщины изолирующего слоя. Как следует из Рис. 2, при больших временах экспозиции экспоненциальный характер поведения временной зависимости T связан с определенным самосогласованием задачи по температуре. То есть мощность отвода энергии также зависит от величины температуры, вернее ее перепада через слой изолятора. Значения температуры насыщения выражаются только через параметры изолятора, что вполне разумно, поскольку именно этот материал отвечает за скорость установление динамического равновесия в стационарном состоянии.

При малых временных интервалах экспозиции наблюдается близкий к линейному ход временной зависимости. Это, по сути, эквивалентно ситуации с низкой теплопроводностью подложки, поскольку такое поведение системы при малых временах отвечает разложению экспоненты в быстросходящийся ряд. Физически это означает, что при малых временах экспозиции температура материала определяется только собственными свойствами без воздействия на температурное поле механизмов отвода тепла. Представленные на Рис.3 кривые с температурой слоя воды более 100 С отвечают ее состоянию при отсутствии возможности кипения и испарения. В действительности жидкость, достигнув температуры испарения, будет покидать материал в виде пара. В данном рассмотрении нас интересовали обстоятельства начального разогрева и такой подход для уяснения динамики высыхания напочвенного материала вполне адекватен.

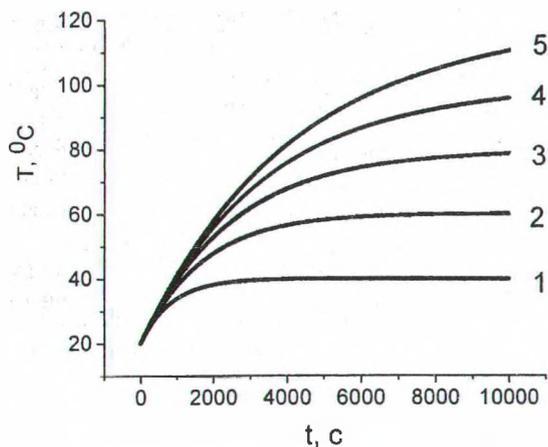


Рис. 2. Изменение температуры слоя воды толщиной 10^{-3} м при поглощении мощности 100 Вт/м^2 и значениях толщины изолирующего слоя d , м: 0.01 (1), 0.02 (2), 0.03 (3), 0.04 (4), 0.05 (5) и его теплопроводности 0.05 Вт/м К .

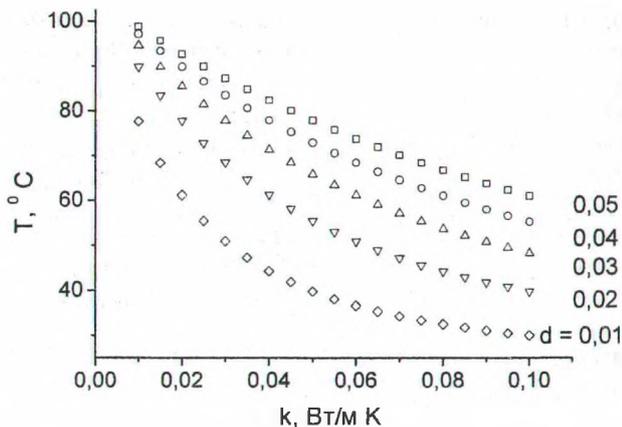


Рис. 3. Зависимость температуры слоя воды толщиной 10^{-3} м от величины теплопроводности изолирующего слоя при эффективном поглощении потока с плотностью 100 Вт/м^2 . Толщина теплоизолирующего слоя d , м: 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 и 0.05. Время экспозиции 3600 сек.

Следует отметить, что до последнего времени анализ безопасности с точки зрения устойчивости напочвенного покрова к возгоранию проводили на основе методологии так называемой абсолютной безопасности. В таком подходе используется приближение учета воздействия всей совокупности неблагоприятных факторов, способствующих распространению огня, которые в конкретной обстановке могут проявить себя с неодинаковой вероятностью. В рамках указанной процедуры считается, что наличие запаса, например по ширине минерализованной полосы, по времени возможного перехода низового пожара в верховой, позволяет гарантировать идеальную безопасность системы. При этом игнорируется маловероятное, но возможное сочетание неблагоприятных факторов, которые все же могут привести к увеличению масштабов пожара. В этой связи избыточный запас кажущейся надежности, который обеспечивается за счет отчуждения под минерализованные полосы значительного пространства, все равно не может обеспечить абсолютной гарантии, при том, что нерационально используются площади лесных угодий. Такое обстоятельство привело к смене концепции "абсолютной безопасности" на современную методологию "относительной безопасности". Основу этой концепции составляет постулат о невозможности обеспечения нулевого риска. В этой связи задача обеспечения безопасности сводится к разумному обустройству пассивных систем защиты по времени их эффективного функционирования и ограничению распространения низовых пожаров, достаточному для подключения сил активного противодействия распространению стихии.

Как показали результаты эксперимента и предварительные оценки можно утверждать, что низовой пожар с плотностью лучистого теплового потока до 20 кВт/м^2 не может воспалить напочвенный покров сосновых насаждений за время меньше десяти минут. Для упреждения распространения огня время, требуемое для реагирования, целесообразно выбирать из расчета одного—двух часов. Соответственно для определения рациональной ширины минерализованной полосы целесообразно провести испытания напочвенного материала на воспаление при меньших плотностях лучистого потока. В дополнение к этому в качестве последующего шага имеет смысл численно смоделировать потоки лучистого излучения от плоского фронта пламени различной геометрии с температурой, характерной для горения напочвенного материала лесов сосновой формации.

Список источников

1. Устойчивое лесопользование и лесопользование: СТБ 1582—2005 // Требования к мероприятиям по охране леса. — Минск: Белгипролес; ИЛ НАН Беларуси, 2005. — 10 с.
2. Отчет о выполнении этапа 3.15.01. "Провести анализ уровня охраны лесов от пожаров и дать оценку эффективности противопожарного обустройства лесного фонда Беларуси" ГНТП "Управление лесами и рациональное лесопользование" — ИЛ НАН Беларуси, Гомель, 2006.
3. Гоман, П.Н. Совершенствование противопожарных требований к обустройству лесных массивов Республики Беларусь: дис. на соискание академической степени м—ра т. наук / П. Н. Гоман. — Минск, 2007. — 77 с.
4. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. / Справочник. — М.: Атомиздат, 1979. — 216 с.
5. Кошмаров, Ю.А., Башкирцев, П.Б. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. — М.: Высшая инженерная пожарно—техническая школа МВД СССР, 1987. — 444 с.
6. ГОСТ 30402—96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость.
7. Гостицев В.И., Дрозд А.А., Соболев В.Р. Особенности низкотемпературного теплосоппротивления алюминия в магнитном поле // ФНТ. — 1988. — Т. 14, № 6. — С. 594 — 598.
8. Соболев В.Р., Криворучко Т.А. О переносе тепла в анизотропных металлических средах // Инженерно—физический журнал. — 1990. — Т. 58, № 4. — С. 670 — 675.