

## ЗАЖИГАНИЕ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПОТОКОМ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

А. М. Гришин, В. П. Зима, В. Т. Кузнецов, А. И. Скорик

Томский государственный университет, 634050 Томск, fire@fire.tsu.tomsk.su

Проведено экспериментальное исследование зажигания слоев из опада хвои кедра, сосны, пихты, листьев березы, а также из лишайника Кладония и мха Шребера. Установлено, что мох зажигается быстрее других лесных горючих материалов. Показано, что время зажигания опада хвои различных деревьев при одинаковом влагосодержании одинаково в пределах точности экспериментальных данных, а для опада листьев березы оно несколько ниже, чем для опада хвойных пород деревьев. Установлено, что наблюдаемые различия связаны с особенностями взаимодействия лучистого потока со слоями опада хвои и листьев. Оценены минимальные значения теплового импульса зажигания опада хвои и листьев для различной плотности тепловых потоков. Отмечена тенденция к минимизации значений этой величины при плотности потоков  $0,5 \div 0,8 \text{ МВт/м}^2$ .

В работах [1–3] экспериментально и теоретически исследован процесс зажигания лесных горючих материалов (ЛГМ) в условиях природных и техногенных катастроф, а в [4] даны оценки экологических последствий ядерных взрывов.

В данной работе продолжены экспериментальные исследования зажигания ЛГМ, начатые в [1]. Исследовано ослабление светового потока в слое опада, и проведено сравнение времен зажигания опада хвои кедра, сосны, пихты, листьев березы, мха и лишайника под действием потока лучистой энергии плотностью  $0,10 \div 2,50 \text{ МВт/м}^2$ .

**Методика проведения экспериментов.** Опыты проводили на установке радиационного нагрева «Уран-1» [5], в которой в качестве источника лучистой энергии использовалась ксеноновая лампа высокого давления ДКСР-10000. Плотность лучистого потока в месте расположения исследуемых образцов перед каждой серией опытов и для контроля в ходе серии измеряли с помощью калориметра, приемная поверхность которого была покрыта ламповой сажей. Относительная погрешность измерений не превышала 10%. Отражение лучистого потока от поверхности образца не учитывалось. Слой опада создавался хаотическим набрасыванием хвоинок и листьев в корзиночки, из-

готовленные из металлической сетки с ячейкой  $1 \times 1 \text{ мм}$  с последующим их потряхиванием для уплотнения материала. Подавляющая часть хвоинок и листьев при этом занимала положение, близкое к горизонтальному. Отдельные вертикально расположенные элементы опада из слоя удалялись. По форме корзиночка представляла параллелепипед размерами  $100 \times 100 \times 20 \text{ мм}$ . Кроме того, в эти же корзиночки закладывались образцы лишайника Кладония и мха Шребера с сохранением естественной структуры и ориентации в пространстве. Материал, используемый в опытах, за исключением специально оговоренных случаев, предварительно высушивался до постоянной массы в мягком режиме (ГОСТ 18867-84) при температуре 338 К и имел влагосодержание 1,3%. Плотность слоя опада, созданного описанными выше способами, составляла  $25 \pm 5 \text{ кг/м}^3$ , что согласуется с известными данными [6, 7] для структуры и плотности в реальных лесных фитоценозах.

Опыты проводили в воздухе при комнатной температуре ( $T = 293 \text{ К}$ ) и атмосферном давлении. За время зажигания принимался промежуток от начала нагрева до появления пламени вблизи поверхности нагреваемого ЛГМ.

Момент подачи лучистого потока на образец фиксировался с помощью фотодиода, появление пламени — с помощью ионизационного датчика, расположенного над поверхностью нагреваемого образца и фотодиода. Сигналы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 98-01-03005 и 99-01-00363) и ФЦП «Университеты России».

от фотодиода и ионизационного датчика регистрировали на осциллографе Н-117/1 и использовали для определения времени зажигания. Как правило, для определения времени зажигания при заданной плотности лучистого потока проводили не менее пяти опытов в одинаковых условиях с последующим осреднением результатов. Отклонение результатов опытов от среднего значения не превышало 12 %.

**Определение коэффициента ослабления излучения.** С точки зрения механики многофазных сред слой высушенного ЛГМ состоит из двух фаз — сухого воздуха и вещества ЛГМ. Согласно [7, 8] естественная плотность типичных элементов ЛГМ (тонких веточек, хвоинок, элементов лишайника Кладония и мха Шребера) значительно больше плотности воздуха. Поэтому при определении массы слоя ЛГМ обычно массу воздуха не учитывают. Тогда объемную долю конденсированного вещества ЛГМ  $\varphi_s$  можно оценить по формуле

$$\varphi_s = P/\rho_0 V, \quad (1)$$

где  $P$  — масса образца слоя ЛГМ в контрольном объеме (корзиночке);  $V$  — величина контрольного объема;  $\rho_0$  — типичная плотность элемента ЛГМ (хвоинки, тонкой веточки).

Очевидно, что эта формула дает оценку сверху величины  $\varphi_s$ , так как в действительности масса образца слоя ЛГМ в объеме  $V$  включает в себя и массу воздуха. Как показали оценки для слоя из хвоинок кедра, объемная доля хвои меняется в пределах  $0,03 < \varphi_s < 0,05$ , т. е. объемная доля конденсированной фазы мала по сравнению с объемной долей воздуха и этот слой имеет рыхлую структуру.

Для понимания результатов по зажиганию слоя ЛГМ представляет интерес исследовать изменение светового потока с изменением высоты слоя. В опытах измеряли относительную плотность светового потока  $\bar{q}_R = q_R(z)/q_{R,0}$  при прохождении излучения через слой хвои кедра определенной высоты, где  $q_{R,0}$  — плотность исходного лучистого потока,  $q_R(z)$  — плотность потока, прошедшего через слой ЛГМ высотой  $z$ , м (начало координат выбиралось на верхней границе слоя, а ось  $z$  направлена вниз). Для этого поток света от электрической лампы накаливания мощностью 100 Вт через конденсор направляли в цилиндрическую измерительную камеру диаметром 0,18 м и высотой 0,40 м. Расположение лампочки, конденсора и камеры относительно друг друга в опытах

поддерживалось постоянным. В центре дна камеры располагался фотоэлемент Ф53с с рабочей поверхностью  $45 \times 45$  мм. Фотоэлемент был подключен к цифровому вольтметру постоянного тока Щ1516. При этом предполагалось, что световой поток, дошедший до дна камеры, пропорционален генерируемому им фототоку, а последний равен разности потенциалов на его входе при постоянном внутреннем сопротивлении вольтметра. Это позволяло определить  $\bar{q}_R$  через  $v_z/v_0$ , где  $v_0$  — показания вольтметра при освещении фотоэлемента исходным потоком света, а  $v_z$  — потоком, прошедшим через слой хвои высотой  $z$ .

После определения  $v_0$  измерения сводились к выполнению следующих процедур. Определенное (заранее взвешенное) количество ЛГМ рассыпали над верхним краем измерительной камеры. Образовавшийся на дне камеры слой хвои разравнивали, накрывали стеклом и с помощью измерительной линейки определяли его высоту  $z$ . Затем включалась электролампочка, снимались показания вольтметра ( $v_z$ ) и рассчитывались относительное ослабление потока ( $\bar{q}_{R,z} = v_z/v_0$ ) и средняя плотность образовавшегося слоя ЛГМ ( $\rho z$ ). Далее навеску ЛГМ увеличивали и указанные выше процедуры и расчеты повторяли.

При определении ослабления излучения лишайником Кладония использовали его природные слои толщиной  $(1 \div 5) \cdot 10^{-2}$  м и площадью, значительно превосходящей рабочую поверхность фотоэлемента.

Обработка полученных данных показала, что экспериментальные результаты по зависимости относительной интенсивности потока после прохождения через слой ЛГМ от высоты этого слоя укладываются на прямую линию в координатах  $\ln \bar{q}_R, \rho z$  (рис. 1). Это означает, что ослабление лучистого потока при прохождении через слой хвои описывается выражением, аналогичным уравнению закона Бугера — Ламберта — Бера [9]:

$$q_R(z) = q_{R,0} \exp(-k \rho z), \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент, аналогичный коэффициенту ослабления в упомянутом выше уравнении,  $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $\rho$  — плотность слоя ЛГМ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , играющая роль концентрации в уравнении закона Бера;  $z$  — текущая высота слоя хвои, м.

Этот результат следовало ожидать, так как согласно оценке (1) слой ЛГМ представ-

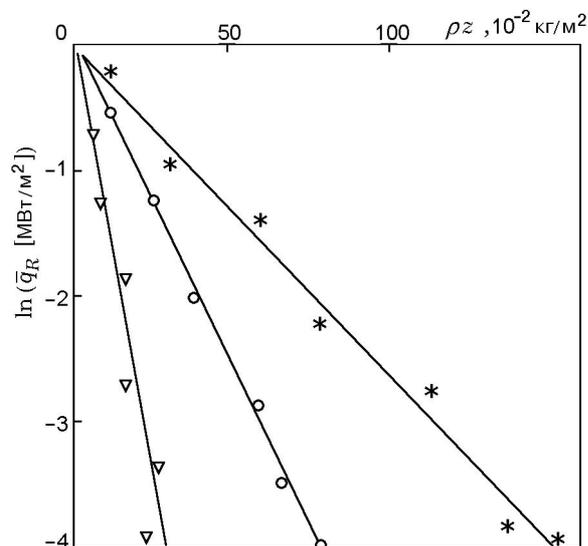


Рис. 1. Зависимость логарифма относительной интенсивности светового потока от величины  $\rho z$ :

1 — мох; 2 — хвоя кедр; 3 — лишайник

ляет легкопроницаемую для излучения среду, что обусловлено малым значением  $\varphi_s$  и рыхлостью опада хвои. Выражение (2) можно использовать для оценки лучистой энергии, поглощенной в слое определенной высоты.

Надо отметить, что использование координаты  $z$  в качестве аргумента функции может привести к неконтролируемой ошибке. В опытах было установлено, что поджатие слоя хвои, приводящее к уменьшению его высоты на  $25 \div 30 \%$ , почти не влияет на относительное ослабление потока  $\bar{q}_R$ .

Рассчитанные по экспериментальным данным значения  $k$  составляют 14,3, 5,1 и  $2,7 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$  для слоя мха, опада хвои кедр и слоя лишайника Кладония соответственно.

Как показали оценки, оптическая толщина слоя ЛГМ для хвойных пород деревьев значительно больше оптической толщины слоя ЛГМ из листьев березы. В то же время длина свободного пробега излучения во всех случаях значительно меньше толщины слоя ЛГМ.

**Результаты исследования процесса зажигания и их анализ.** Результаты измерения времени зажигания опада ЛГМ при различных плотностях лучистого потока приведены на рис. 2. На этом же рисунке приведены времена зажигания хвои кедр с влажностью 140% (кривая 1). Отметим, что повышение влагосодер-

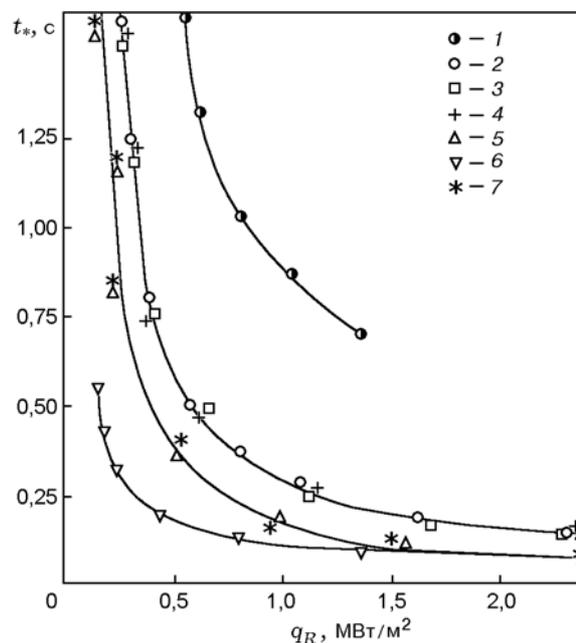


Рис. 2. Время зажигания опада ЛГМ при различных плотностях лучистого потока:

1 — свежесорванная хвоя кедр; 2–4 — сухой слой опада хвои кедр, сосны, пихты; 5 — слой опада листьев березы; 6 — мох; 7 — лишайник

жания существенно ухудшало воспроизводимость измерений: отклонение результатов повторных опытов от среднего значения достигало 28%. Как видно из приведенных данных, время зажигания хвои различных древесных пород (точки 2–4) почти одинаково при всех плотностях лучистого потока. Повышение влагосодержания увеличивает время зажигания хвои. Эти результаты согласуются с данными, приведенными в [1]. Время зажигания листьев березы (точки 5) меньше времени зажигания хвои. Наибольшее различие наблюдается в области низких плотностей лучистых тепловых потоков. Мох зажигается легче, чем остальные исследуемые вещества. Интересно ведет себя кривая времени задержки зажигания лишайника (см. кривую 7 на рис. 2). При относительно низких тепловых потоках (до  $0,8 \text{ МВт/м}^2$ ) время зажигания лишайника сопоставимо с временем зажигания листьев березы, а с увеличением светового потока практически совпадает с временем зажигания мха. Для выяснения возможных причин различной воспламеняемости опада ЛГМ были проведены дополнительные опыты.

С использованием термогравиметричес-

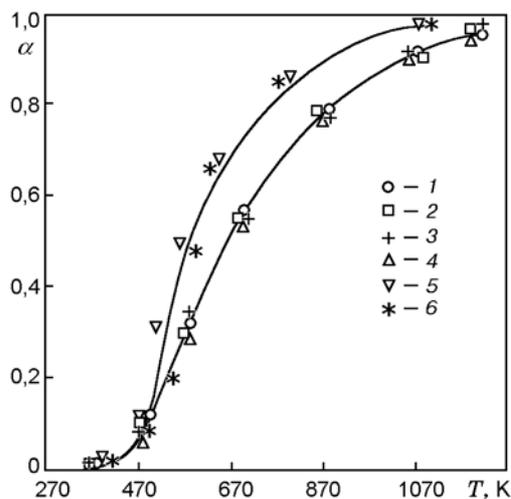


Рис. 3. Зависимость доли прореагировавшего вещества от температуры при пиролизе ЛГМ:  $\alpha = (m_0 - m)/m_0$ , где  $m_0, m$  — массы образца при начальной (293 К) и текущей температурах; 1-3 — хвоя кедр, сосны, пихты; 4 — листья березы, 5 — мох; 6 — лишайник

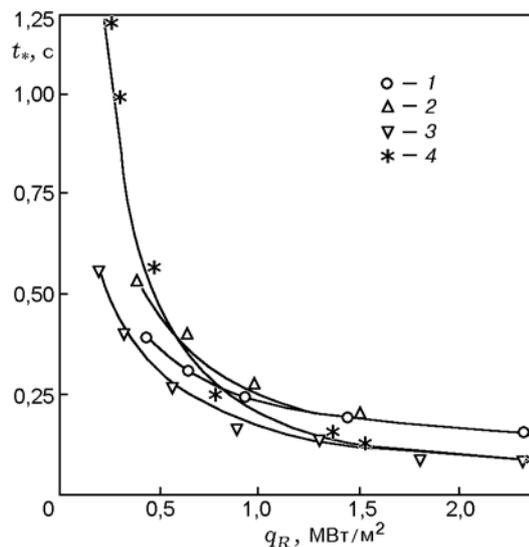


Рис. 4. Влияние плотности лучистого потока на время зажигания прессованных образцов ЛГМ:

1 — хвоя кедр; 2 — листья березы; 3 — мох; 4 — лишайник

кой методики изучена кинетика пиролиза исследуемых материалов. Опыты проводили на дериватографе Q-1500D в воздухе при темпе нагрева 10 К/мин. Полученные результаты показали, что пиролиз всех видов хвои, имеющих одинаковое время зажигания, и листьев березы, для которых время зажигания меньше, чем для слоя хвои, протекает практически одинаково: убыль массы начинается при температуре  $\approx 353$  К, достигает максимальной скорости при  $\approx 593$  К и заканчивается при достижении температуры  $1073 \div 1123$  К. Пиролиз мха и лишайника, зажигание которых характеризуется наименьшими временами (см. рис. 2), протекает более интенсивно, максимальная скорость убыли массы достигается при температуре  $\approx 560$  К, а прекращение убыли массы — при  $\approx 970$  К. До температуры  $\approx 550$  К газовыделение у мха почти в два раза выше, чем у лишайника, а начиная с температуры  $\approx 570$  К газовыделение у мха и лишайника идет с одинаковой скоростью, причем несколько большей, чем у листьев березы и хвои (рис. 3). Такой характер газовыделения у мха и лишайника, по-видимому, объясняет особенности их зажигания световым потоком. Масса твердого остатка у всех ЛГМ составляет  $4 \div 6$  % массы исходного материала.

Были определены также времена зажигания хвои кедр, листьев березы, мха и лишай-

ника. Для этого исходный состав влажосодержанием 1,3 % измельчали, добавляли 1 % сажи для выравнивания коэффициентов отражения и поглощения и прессовали в таблетки диаметром  $1 \cdot 10^{-2}$  м, высотой  $0,5 \cdot 10^{-2}$  м и плотностью  $(0,8 \div 0,9) \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>. Методика и условия определения времени зажигания были аналогичны описанному выше. Полученные результаты приведены на рис. 4. Видно, что время зажигания хвои и листьев в виде таблеток при плотности лучистого потока выше 1 МВт·м<sup>-2</sup> практически одинаково, а при более низких потоках время зажигания хвои меньше времени зажигания листьев березы (кривые 1, 2). Таблетки из мха и лишайника зажигаются быстрее, чем таблетки из хвои кедр и листьев березы. Однако при потоке плотностью ниже 1,3 МВт/м<sup>2</sup> резко снижается и воспламеняемость лишайника.

Результаты дополнительных опытов показывают, что различия во временах зажигания слоев опада хвои и листьев связаны не с отличиями их физико-химических свойств (плотности, реакционной способности), а, прежде всего, с особенностями поглощения лучистой энергии упомянутыми выше слоями.

Действительно, прямые измерения, выполненные на спектрофотометре СФ-26 в видимой и ближней инфракрасной областях спек-

тра, показали, что толщина одного листа или хвоинки кедр превышает толщину слоя полного поглощения излучения в данных материалах. Следовательно, в случае опада листьев поглощение лучистого потока (кроме отраженной части) будет происходить в листьях, расположенных на внешней стороне слоя, а дальнейшее формирование прогретого слоя в материале будет идти только за счет теплопроводности. Более глубокое проникновение лучистого потока возможно лишь за счет обугливания и механического разрушения верхнего слоя листьев. В случае же опада хвои за счет наличия в нем сквозных пустот, суммарное сечение которых на единицу поверхности определяется условиями формирования слоя опада и уменьшается по мере увеличения высоты слоя, лучистый поток может проникать на значительно большую глубину. Ширина слоя половинного ослабления, рассчитанная с использованием найденных выше зависимостей  $q_R(z)$  и значений коэффициента поглощения, составляет  $0,4 \div 0,5$  см, десятикратного ослабления —  $1,6 \div 2,0$  см.

Отметим, что из-за «рыхлого» характера слоя хвои могут уменьшиться потери лучистой энергии, связанные с отражением, при постоянном коэффициенте отражения отдельных хвоинок. Истинные потери будут связаны лишь с энергией, отраженной верхними слоями хвоинок. Энергия, отраженная хвоинками внутри опада, может остаться в прогретом слое за счет многократного отражения.

На основании полученных выше результатов по зависимости времени зажигания от интенсивности лучистого потока (см. рис. 2) проведена оценка теплового импульса зажигания различных типов опада, определяемых как произведение плотности лучистого потока на время зажигания при данном потоке:  $I_q = q_R t_*$ . Результаты, приведенные на рис. 5, показывают, что имеется тенденция к минимизации теплового импульса зажигания при определенных значениях плотности лучистого потока, в нашем случае — при  $q_R = 0,5 \div 0,8$  МВт/м<sup>2</sup>. Уменьшение или увеличение плотности потока приводит к устойчивому росту теплового импульса.

Аналогичный характер изменения энергии зажигания наблюдали при изучении зажигания модельных смесевых топлив (см., например, [10]). Повышение энергии зажигания при понижении плотности лучистого потока объясняется увеличением теплотерь за счет уве-

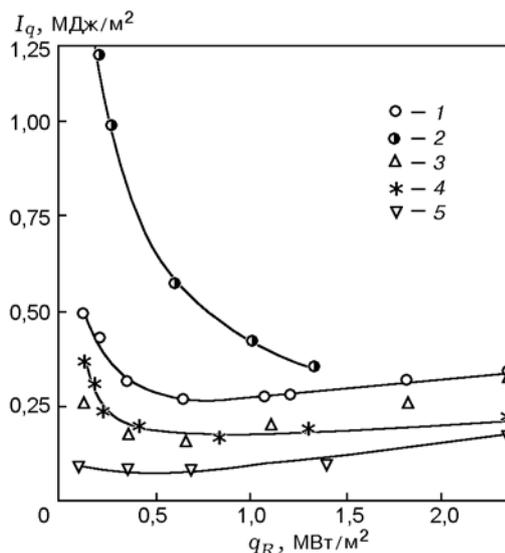


Рис. 5. Влияние плотности лучистого потока на энергию зажигания слоя опада ЛГМ:

1 — свежесорванная хвоя кедр с влажностью 140 %; 2 — хвоя кедр; 3 — листья березы; 4 — лишайник; 5 — мох

личения ширины прогретого слоя и времени нагрева поверхности образца. Рост плотности теплового потока в соответствии с известным в физике принципом Ле-Шаталье интенсифицирует процессы пиролиза материала опада, что приводит к уносу дополнительных количеств тепла с поверхности образца и частичному поглощению лучистого потока продуктами пиролиза. Снижение критического теплового импульса при зажигании ЛГМ с ростом плотности лучистого потока от излучающей графитовой пластины отмечено в [3] для интервала  $15 < q_R < 42$  кВт/м<sup>2</sup>. Рост критического теплового импульса при дальнейшем увеличении плотности лучистого потока впервые обнаружен в данной работе.

Следует отметить, что в области высоких плотностей лучистых потоков появление пламени не является достаточным условием для возникновения очага устойчивого горения. Как и в случае зажигания смесевых топлив [11], возможно появление пламени в режиме ожога поверхности горючего, а для перехода к устойчивому горению необходим подвод дополнительной энергии. Поэтому приведенные выше значения энергий зажигания могут рассматриваться как оценки снизу, по крайней мере, в области высоких плотностей потоков. Эти результаты согласуются с численными результа-

тами, полученными в [2, 3], согласно которым вблизи эпицентра при взрыве космических тел или ядерных устройств в приземном слое атмосферы отсутствует нормальный режим зажигания.

### ВЫВОДЫ

1. Создана комплексная экспериментальная методика для исследования особенностей распространения излучения и зажигания слоя ЛГМ.

2. Опад хвои имеет рыхлую структуру, объемная доля хвои меняется в пределах  $0,03 \leq \varphi_s \leq 0,05$ , а плотность лучистого теплового потока следует закону Бугера — Ламберта — Бера, который, как правило, выполняется для запыленных сред [9]. Поэтому для описания процессов переноса в слое опада целесообразно использовать уравнения, предложенные в [7], в которых учитывается многофазность слоя ЛГМ, перенос энергии излучением в рамках диффузионной модели, а также гетерогенные и гомогенные реакции горения.

3. Получены зависимости времени зажигания опада хвои кедра, пихты, сосны и листьев березы в условиях нагрева лучистым потоком при его плотности  $q_R = 0,1 \div 2,5$  МВт/м<sup>2</sup>, что существенно выше соответствующих значений плотности лучистого теплового потока в [1], где  $0 < q_R < 0,4$  МВт/м<sup>2</sup>. Показано, что время зажигания опада хвои различных деревьев при одном и том же влагосодержании одинаково в пределах точности экспериментальных данных, а для опада листьев березы оно несколько ниже, чем для опада хвойных пород. Для объяснения этой закономерности проведено сравнение оптических и физических толщин слоя ЛГМ. Установлено, что наблюдаемые различия связаны с особенностями взаимодействия лучистого потока со слоями опада хвои и листьев. Оценены минимальные значения теплового импульса зажигания опада хвои листьев при различной плотности тепловых потоков. Отмечена тенденция к минимизации значений этой величины при  $q_R = 0,5 \div 0,8$  МВт/м<sup>2</sup>. Найдено,

что сухой мох обладает повышенной воспламеняемостью по сравнению с лишайником, хвоей и листьями березы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Курбатский Н. П. О возникновении лесного пожара в районе падения Тунгусского метеорита // Проблемы метеоретики. Новосибирск: Наука, 1975. С. 69–71.
2. Гришин А. М., Ефимов К. Н., Перминов В. А. Зажигание лесных массивов в результате космических и техногенных катастроф // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 2. С. 18–31.
3. Гришин А. М., Перминов В. А. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 5. С. 107–115.
4. Пинаев В. С., Щербаков В. А. Пожары, вызванные ядерными взрывами и их последствия // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 5. С. 116–121.
5. Лопатина Г. Г., Сасоров В. П., Спицын Б. В., Федосеев Д. В. Оптические печи. М.: Металлургия, 1969.
6. Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1970. С. 3–58.
7. Grishin A. M. Mathematical modeling of forest fire and new methods of fighting them. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997.
8. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977.
9. Ключников Л. Д., Иванцов Г. П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках. М.: Энергия, 1970.
10. Кузнецов В. Т., Марусин В. П., Скорик А. И. К вопросу о механизме зажигания гетерогенных систем // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 4. С. 526–529.
11. Дик И. Г., Зурер А. Б., Кузнецов В. Т. Об устойчивости зажигания конденсированных веществ при воздействии импульса теплового потока // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 3. С. 77–82.

*Поступила в редакцию 24/VIII 2000 г.,  
в окончательном варианте — 2/II 2001 г.*