



DOI 10.21178/2079-6080.2023.3.112  
УДК 614.841.42(476)

## Воспламеняемость лесного горючего материала при воздействии теплового потока

© П.Н. Гоман

### Flammability of forest combustible material when exposed to the heat flow

**P.N. Goman** (University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus)

In recent years, the number of forest fires has significantly increased in a number of countries of the world, often acquiring catastrophic scales, which is largely caused by global warming. In the current situation, adaptation of fire protection measures to the conditions of prolonged drought and increased fire hazard of forest combustible material is required. One of the main factors affecting the occurrence and spread of forest fires is the ability of the ground cover to ignite and maintain the combustion process when exposed to an ignition source. Open flames, sparks, hot objects, thermal radiation can serve as sources for initiating combustion. Based on the data on the thermal resistance of vegetation, the probability of occurrence and conditions for the development of fires are predicted, methods are being developed to increase the fire resistance of natural ecosystems and limit the development of combustion. A significant place in the issues of forest fire prevention is given to the creation of a system of fire barriers that limit the spread of fires. The width of the obstacle should ensure that the level of thermal impact on the ground material is below the critical value. In this regard, the study of the flammability of forest combustible material is extremely relevant.

In the course of the studies, it was found that the critical (minimum) value of the heat load required to ignite the main conductors of ground combustion in the form of moss, needle litter, small branches, foliage and bark is about 10 % humidity, which meets the conditions of a fire hazard period, is 20 kW/m<sup>2</sup>. With an increase in the moisture content of the ground cover up to 30 %, the ignition of forest combustible material, depending on its type, is observed at a heat load level of 35–40 kW/m<sup>2</sup>.

**Key words:** forest fire, ground cover, flame front, thermal radiation, ignition, fire barrier

### Воспламеняемость лесного горючего материала при воздействии теплового потока

**П.Н. Гоман**

В последние годы в ряде стран мира существенно возросло количество лесных пожаров, зачастую приобретающих катастрофические масштабы, что во многом вызвано глобальным потеплением. В сложившейся ситуации требуется адаптация мероприятий противопожарной защиты к условиям продолжительной засухи и повышенной пожарной опасности лесного горючего материала. Одним из основных факторов, влияющих на возникновение и распространение лесных пожаров, является способность напочвенного покрова к воспламенению и поддержанию процесса горения при воздействии источника зажигания. В качестве источников для инициирования горения могут служить открытое пламя, искры, раскаленные предметы, тепловое излучение. На основании данных по тепловой стойкости растительности прогнозируются вероятность возникновения и условия развития пожаров, разрабатываются способы повышения пожарной устойчивости природных экосистем и ограничения развития горения. Существенное место в вопросах лесопожарной профилактики отводится созданию системы противопожарных барьеров, ограничивающих распространение пожаров. Ширина барьера должна обеспечить уровень теплового воздействия на напочвенный материал ниже критического значения. В этой связи исследование воспламеняемости лесного горючего материала при воздействии тепловой нагрузки является крайне актуальным.

В ходе проведенных исследований установлено, что критическим (минимальным) значением тепловой нагрузки, требуемой для воспламенения основных проводников напочвенного горения в виде мха, опада хвоя, мелких веток, листьев и коры влажностью около 10 % (что отвечает условиям пожароопасного периода), является 20 кВт/м<sup>2</sup>. С увеличением влажности напочвенного покрова до 30 % воспламенение лесного горючего материала в зависимости от его вида происходит при уровне тепловой нагрузки 35–40 кВт/м<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** лесной пожар, напочвенный покров, фронт пламени, тепловое излучение, воспламенение, противопожарный барьер

Гоман Павел Николаевич – доцент кафедры промышленной безопасности, канд. техн. наук, доцент  
E-mail: g-pn83@mail.ru

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»  
220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25, Республика Беларусь  
E-mail: mail@ucp.by

### Введение

В системе охраны лесов от пожаров вопросам тепловой стойкости лесного горючего материала (далее – ЛГМ) на современном этапе отводится важная роль. На основании предрасположенности ЛГМ к прогреву, воспламенению и поддержанию процесса горения определяются параметры противопожарных барьеров, моделируются условия развития пожаров, выбираются способы их тушения. Методики проведения подобных исследований многообразны, зачастую достаточно разрозненны по характеру и включают лабораторные и натурные эксперименты, а также численное моделирование. В ходе исследований изучаются процессы воздействия на ЛГМ различных источников зажигания, начиная от прямого (непосредственного) воздействия огня, заканчивая процессами зажигания напочвенного покрова сфокусированным солнечным излучением или нагретой до высокой температуры частицей [2, 7, 10, 15, 18–22].

Так, в работе А.М. Гришина с соавторами [7] представлены результаты экспериментального исследования процесса зажигания ЛГМ в виде опада хвои кедр, сосны, пихты, листьев березы, лишайника и мха при воздействии тепловой нагрузки 100–2500 кВт/м<sup>2</sup>. Опыт проводился на установке «Уран-1» с излучателем в виде ксеноновой лампы высокого давления ДКСР-10000. Установлено, что время воспламенения образцов ЛГМ в зависимости от их вида и плотности составляет 0,2–1,5 с. Однако следует отметить, что моделируемые значения тепловой нагрузки едва ли достижимы в условиях лесных пожаров и выбраны исходя из специфики используемой лампы [14–16], не позволяющей создавать тепловую нагрузку меньших значений. Применение полученных результатов в системе охраны лесов от пожаров, в частности, при оценке ширины противопожарных барьеров, может привести к необоснованному ее уменьшению и снижению эффективности преград.

Результаты численного моделирования процесса зажигания напочвенного покрова нагретой до высокой температуры стальной и углеродистой частицей, имитирующей перелет искр, представлены в работе Г.В. Кузнецова с соавторами [10]. Проведенные исследования показали, что стальные частицы опаснее углеродистых и при температуре 900–1200 К способны воспламенить слой наземного ЛГМ на расстояние до 3 м в течение 0,18–1,37 с; для углеродистых частиц возгорание происходит за 0,24–2,73 с. Следует отметить, что авторами не конкретизированы параметры исследованного

ЛГМ, а именно: его вид, влажность, плотность и толщина слоя. Кроме того, не обоснованы используемые в расчете теплофизические характеристики напочвенного покрова, что затрудняет применение полученных данных для различных природно-климатических условий.

В работе Н.В. Барановского [2] приведены результаты оценки вероятности воспламенения напочвенного покрова солнечным излучением, сфокусированным осколками стекла и смолистыми образованиями. Указывается возможность достижения на поверхности напочвенного покрова тепловой нагрузки в 15–40 кВт/м<sup>2</sup> с воспламенением ЛГМ через 18–105 с. Данные исследования позволяют выработать направления пожарно-профилактической работы, однако ввиду незначительности пожаров такой природы как в Беларуси, так и в Российской Федерации, они не приведут к существенному снижению числа возгораний [8, 14].

Значительное место в вопросах обеспечения пожарной безопасности природных экосистем отводится процессам воспламенения ЛГМ лучистым тепловым потоком от фронта пламени. Это позволяет определить безопасные расстояния до расположенных вблизи лесного фонда зданий и сооружений, сельскохозяйственных угодий и формулировать принципы противопожарной защиты. Воспламеняемость горючих материалов общепринято определять экспериментальным методом посредством моделирования воздействия характерной для условий пожаров тепловой нагрузки от излучателя на исследуемые образцы малых размеров [3, 4, 6, 12, 13]. В частности, в ряде технических нормативных правовых актов [6, 13] используется методика оценки ширины противопожарных разрывов, в соответствии с которой на первом этапе, исходя из параметров фронта пламени (ширина, высота, температура) и расположения относительно него облучаемой поверхности, рассчитывается уровень тепловой нагрузки, воздействующей на горючий материал за противопожарным разрывом. На втором этапе проводится экспериментальное исследование по определению критической (минимальной) поверхностной плотности лучистого теплового потока, при которой происходит воспламенение горючего материала. На третьем этапе делается сравнительная оценка расчетной и экспериментальной тепловой нагрузки с проверкой условия безопасности, когда расчетная тепловая нагрузка меньше критической. По ряду горючих материалов значения критической тепловой нагрузки определены и представлены в таблице.

Таблица  
Критические значения плотности лучистого теплового потока в зависимости от времени облучения для некоторых горючих материалов [6]

Материал	Минимальная тепловая нагрузка при различной продолжительности теплового воздействия, кВт/м <sup>2</sup>		
	3 мин	5 мин	15 мин
Древесина (сосна влажностью 12 %)	18,8	16,9	13,9
Древесно-стружечная плита плотностью 417 кг/м <sup>3</sup>	13,9	11,9	8,3
Торф брикетный	31,5	24,4	13,2
Торф кусковой	16,6	14,4	9,8
Хлопок-волокно	11,0	9,7	7,5
Слоистый пластик	21,6	19,1	15,4
Стеклопластик	19,4	18,6	17,4
Пергамин	22,0	19,8	17,4
Резина	22,6	19,2	14,8
Уголь	–	35,0	35,0

В литературных источниках [3, 6, 12, 13, 17] освещен узкий перечень горючих материалов с критическим уровнем тепловой нагрузки; в нем отсутствуют наиболее важные для теории лесных пожаров данные по воспламеняемости основного проводника горения – наземного ЛГМ в виде мха, опада хвои, мелких веток, коры и листья, что затрудняет разработку противопожарных мероприятий в лесных насаждениях. Также следует отметить, что данные, представленные в таблице, получены методом определения горючести твердых строительных материалов около 45 лет назад [12]. При этом данный метод не позволяет исследовать органические материалы, в том числе лесную растительность. Суть метода заключается в оценке воспламеняемости образцов твердого материала строго фиксированных размеров, подвешенных на кронштейн в трубчатой печи, обмотанной нагревательным элементом для создания требуемого уровня тепловой нагрузки. При проведении экспериментов тепловой поток от стенок печи воздействует на все стороны подвешенного образца, что не отвечает реальным условиям теплообмена при пожаре. В результате значения критической тепловой

нагрузки для горючих материалов зачастую были занижены.

Кроме того, использовать показатели воспламеняемости древесины и торфа при разработке мероприятий противопожарной защиты природных экосистем не совсем корректно, так как основной проводник горения в лесу в виде напочвенного покрова более чувствителен к прогреву и воспламенению. Для повышения эффективности пожарно-профилактических мероприятий, включая требования к ширине противопожарных барьеров, требуется комплексный анализ процессов воздействия на напочвенный покров высокотемпературных нагрузок, возникающих в области действия обширных тепловых фронтов лесных пожаров. В этой связи, для определения показателей воспламеняемости ЛГМ наиболее приемлемым является метод, изложенный в ГОСТ 30402-96 [4], позволяющий смоделировать воздействие на напочвенный покров характерной для лесных пожаров тепловой нагрузки.

Целью проведенных исследований являлось определение способности наземного ЛГМ к воспламенению при воздействии лучистого теплового потока.

**Материалы и методы исследования**

Эксперименты, направленные на установление зависимости времени воспламенения ЛГМ от воздействующей тепловой нагрузки, а также ее критического (минимального) значения, при котором возникает устойчивое пламенное горение ЛГМ различного вида, влажности и плотности, выполнены на базе испытательной лаборатории Государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

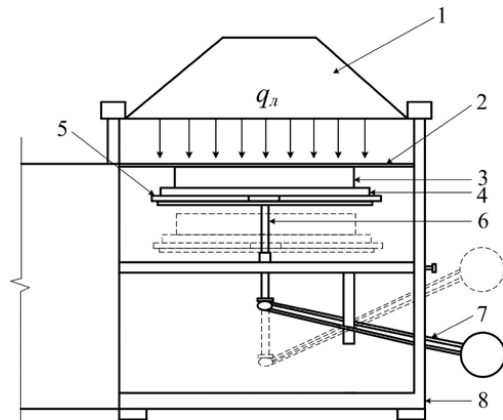
Для проведения исследований в сосновых насаждениях Республики Беларусь, отнесенных к наиболее опасному первому лесопожарному поясу, был произведен отбор образцов наземного ЛГМ в виде мха, опада сосновой, еловой хвои, листья, мелких веток и сосновой коры. Перед испытаниями образцы ЛГМ с применением сушильно-весового метода по ГОСТ 16588-91 [5] (формула 1)

разбивались на три группы влажности: 10, 20 и 30 %, которые отвечают условиям пожароопасных засушливых периодов, когда, по данным Е.С. Арцыбашева [1], возникает большинство случаев лесных пожаров (48 из 50).

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} 100, (1)$$

где  $w$  – влажность образца, %;  
 $m_1$  – масса образца до сушки, г;  
 $m_2$  – масса образца после сушки, г.

Общий вид лабораторной установки для исследования воспламеняемости ЛГМ представлен на рисунке 1 [4]. Экспериментальный комплекс соответствует требованиям ГОСТ 30402-96 [4] и состоит из источника лучистого теплового потока (радиационная панель) и опорной станины с подвижной платформой для перемещения образца ЛГМ в зону теплового воздействия.

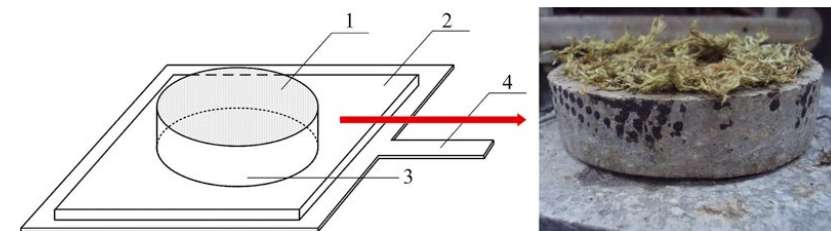


- 1 – радиационная панель с нагревательным элементом;
- 2 – защитная плита с отверстием в центре  $d = 150$  мм,
- 3 – кольцо из асбеста для расположения образца;
- 4 – асбестоцементный лист;
- 5 – держатель образца в форме лопатки;
- 6 – передвижная платформа;
- 7 – рычаг с противовесом;
- 8 – опорная станина в сборе

Рис. 1. Схема установки для испытаний ЛГМ на воспламеняемость

К дополнительному оборудованию установки относится защитная плита, экранирующая пластина, держатель образца, лист и кольцо из асбестоцемента, система контроля плотности теплового потока и регистратор времени с погрешностью 0,1 с. Конструктивно радиационная панель состоит из кожуха с теплоизолирующим слоем и нагревательного элемента. В качестве теплоизолирующего слоя используется негорючий минераловолокнистый материал. Нагревательный элемент диаметром около 9 мм и длиной 3,5 м имеет номинальную мощность 3 кВт, свернут в форму усеченного конуса и прикреплен к внутренней поверхности кожуха радиационной панели. Он обеспечивает заданный уровень однородного теплового потока в отверстии защитной плиты диаметром 150 мм. Диапазон формируемых радиационной панелью уровней тепловой нагрузки на поверхности образца ЛГМ составляет от 5 до 50 кВт/м<sup>2</sup> с шагом 5 кВт/м<sup>2</sup> [4].

В ходе эксперимента образец ЛГМ равномерно размещался в асбестоцементном кольце диаметром 170 мм, расположенном на асбестоцементном листе толщиной 10 мм, который в свою очередь находился на держателе образца (рис. 2). С лицевой поверхности образец накрывался алюминиевой фольгой толщиной 0,2 мм, в центре которой вырезано отверстие диаметром 140 мм. При этом центр отверстия в фольге совпадал с центром экспонируемой поверхности образца. Далее держатель с образцом устанавливался на передвижную платформу и посредством рычага с противовесом перемещался в зону теплового воздействия. После снятия экранирующей пластины с защитной плиты запускался регулятор времени и испытание начиналось. Масса образцов в процессе исследований в зависимости от вида и влажности ЛГМ составляла 10–35 г.



- 1 – образец ЛГМ;
- 2 – асбестоцементный лист;
- 3 – кольцо из асбеста для расположения образца;
- 4 – держатель образца в форме лопатки

Рис. 2. Схема размещения образца ЛГМ для проведения испытаний на воспламеняемость

На первом этапе эксперименты проводились при уровне тепловой нагрузки в 50 кВт/м<sup>2</sup>. Затем уровень теплового воздействия уменьшался на 5 кВт/м<sup>2</sup> и опыт повторялся вновь до значения тепловой нагрузки, при котором не возникает устойчивое пламенное горение образца ЛГМ. Испытание каждого последующего образца проводилось после охлаждения держателя образца до комнатной температуры. На всех значениях тепловой нагрузки исследовалось по три образца ЛГМ. Опыт прекращался при достижении значения тепловой нагрузки, при

котором отсутствовало воспламенение трех образцов.

В ходе экспериментов фиксировалось время воспламенения образцов ЛГМ в зависимости от уровня воздействующей тепловой нагрузки, а также определялось ее минимальное значение, при котором возникает устойчивое пламенное горение ЛГМ.

**Результаты и их обсуждение**

При проведении лабораторных исследований процесс теплового воздействия на об-

разцы ЛГМ условно можно разделить на три этапа: сушка, пиролиз и воспламенение. В процессе сушки происходит испарение имеющейся в материале влаги, что более отчетливо выражено при значениях тепловой нагрузки 30–50 кВт/м<sup>2</sup> (рис. 3). Процесс пиролиза

связан с термическим разложением образцов с активным образованием газообразных продуктов пиролиза. Процесс воспламенения характеризуется возгоранием продуктов пиролиза с возникновением устойчивого пламенного горения (рис. 4).



Рис. 3. Интенсивное испарение влаги при высокоинтенсивном тепловом воздействии на образец ЛГМ



Рис. 4. Воспламенение образца ЛГМ при воздействии теплового излучения

В ходе экспериментов установлено, что основными факторами, влияющими на воспламенение ЛГМ, являются его вид и влажность (рис. 5–7). Изменение плотности ЛГМ

в характерном для Беларуси диапазоне 25–150 кг/м<sup>3</sup> приводит к изменению времени воспламенения в пределах 15 %, что не является существенным.

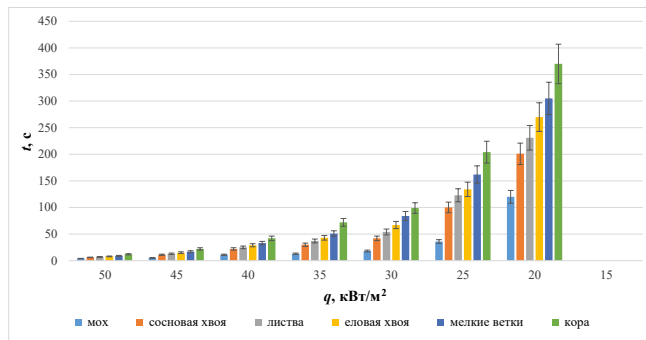


Рис. 5. Зависимость времени воспламенения образцов ЛГМ влажностью 10 % от плотности лучистого теплового потока

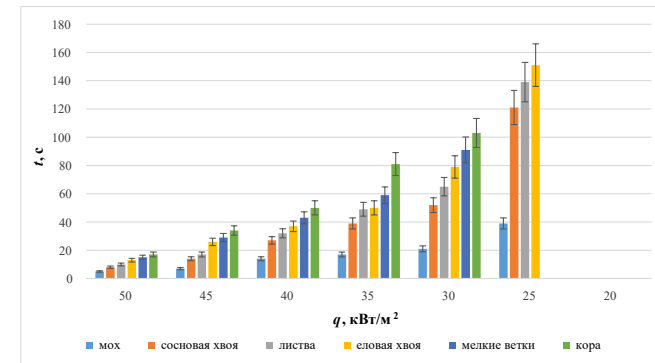


Рис. 6. Зависимость времени воспламенения образцов ЛГМ влажностью 20 % от плотности лучистого теплового потока

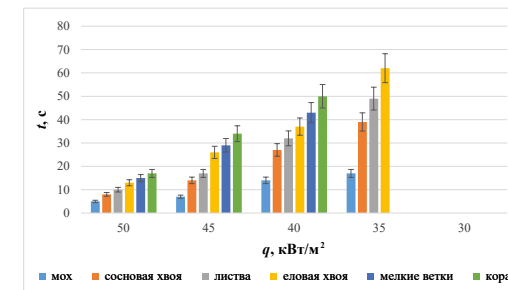


Рис. 7. Зависимость времени воспламенения образцов ЛГМ влажностью 30 % от плотности лучистого теплового потока

Как видно на рисунках, с уменьшением тепловой нагрузки на образцы ЛГМ время воспламенения увеличивается. Так, при максимальном тепловом воздействии в 50 кВт/м<sup>2</sup> воспламенение образцов ЛГМ влажностью 10 % в зависимости от их вида происходит в течение 4–12 с. С увеличением влажности ЛГМ до 30 %, время воспламенения образцов возрастает до 5–17 с. При этом наиболее склонным к воспламенению из рассмотренных образцов ЛГМ является мох, что, видимо, обусловлено наличием большого количества пустот между стеблями, способствующих поступлению кислорода в зону

химической реакции и, как следствие, более интенсивному прогреву и пиролизу.

Также следует отметить, что при влажности ЛГМ 10 % наблюдается воспламенение всех исследуемых образцов в диапазоне тепловой нагрузки 20–50 кВт/м<sup>2</sup>. При тепловом воздействии в 15 кВт/м<sup>2</sup> случаев воспламенения ЛГМ указанной влажности не установлено.

При изменении влажности образцов ЛГМ до 20 % происходит незначительное повышение времени воспламенения образцов в диапазоне тепловой нагрузки 25–50 кВт/м<sup>2</sup>. При этом критическое значение плотности лучистого теплового потока для образцов мха,

сосновой, еловой хвои и листы повышается до 25 кВт/м<sup>2</sup>. Для мелких веток и коры данное значение составляет 30 кВт/м<sup>2</sup>.

При влажности образцов ЛГМ 30 % минимальная тепловая нагрузка, требуемая для воспламенения мха, сосновой, еловой хвои и листы, составляет 35 кВт/м<sup>2</sup> при времени воспламенения образцов 17–62 с. Мелкие ветки и кора при этом способны воспламеняться при минимальной тепловой нагрузке в 40 кВт/м<sup>2</sup> в течение 43 и 50 с соответственно.

Также следует отметить, что высота слоя образцов ЛГМ, которая варьировалась от 1 см для опада хвои, листы, коры и мелких веток до 7 см для мха, не оказывает значительного влияния на его воспламеняемость, что объясняется их общей органической природой и, видимо, достижением критического значения температуры в верхнем слое образцов, что является достаточным для возникновения устойчивого пламенного горения.

Кроме того, необходимо подчеркнуть, что полученные зависимости по воспламе-

нению исследуемых ЛГМ характерны и для случаев их смешения в различной пропорции. При этом время воспламенения и критическая тепловая нагрузка будут определяться по преобладающему в напочвенном покрове ЛГМ с погрешностью не более 15 %.

Помимо основного экспериментального метода оценки воспламеняемости горючих материалов по критической плотности лучистого теплового потока, условия их воспламенения можно определить аналитически по достигаемой в слое материала критической температуре [2, 9, 12]. В частности, для оценки параметров воспламеняемости ЛГМ большей плотности или высоты, что затруднительно смоделировать в лабораторных условиях, можно воспользоваться формулой (2), представленной в работе А.В. Лыкова [11], и сделать вывод о воспламенении образцов при достижении в слое материала температуры воспламенения, которая по данным Ю.А. Кошмарова с соавт. [9], для древесных материалов составляет около 680 К.

$$T = \frac{q}{\lambda} \left[ \frac{\lambda t}{c \rho D} - \frac{D^2 - 3x^2}{6D} + D \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{(n\pi)^2} \cos\left(\frac{n\pi x}{D}\right) e^{-\left(\frac{n^2 \pi^2 \lambda t}{c \rho D^2}\right)} \right] + T_0, \quad (2)$$

где  $T$  – температура материала, К;  $q$  – плотность лучистого теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время воздействия лучистого теплового потока, с;  $D$  – высота слоя материала, м;  $T_0$  – начальная температура материала, К;  $x$  – координата точки наблюдения в слое материала, м.

В частности, на рисунке 8 представлены результаты аналитического исследования процесса воспламенения мха влажно-

стью 10 % и высотой слоя 7 см при критической для него тепловой нагрузке в 20 кВт/м<sup>2</sup>.

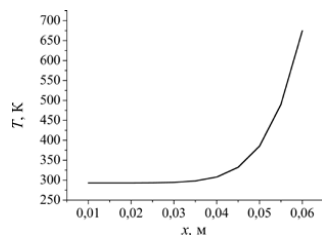


Рис. 8. Распределение температуры в слое мха влажностью 10 % и высотой 0,07 м в момент воспламенения ( $t = 120$  с) от воздействия тепловой нагрузки 20 кВт/м<sup>2</sup> ( $\rho = 125$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 0,2$  Вт/(м·К),  $c = 2000$  Дж/(кг·К),  $T_0 = 293$  К)

Как видим, при времени теплового воздействия 120 с, что соответствует условиям воспламенения мха, он не успевает прогреться по всей глубине. Температура воспламенения формируется раньше, в верхней области мха, на которую оказывается высокотемпературное воздействие.

#### Заключение

В результате проведенных исследований процесса воспламенения ЛГМ установлено, что основным фактором, влияющим на возникновение устойчивого пламенного горения ЛГМ при воздействии тепловой нагрузки, является его влажность. Критическое (минимальное) значение плотности лучистого теплового потока, приводящего к воспламенению ЛГМ в виде мха, опада сосновой и еловой хвои, листы, мелких веток, сосновой коры влажностью 10 %, составляет 20 кВт/м<sup>2</sup> при времени воспламенения от 120 с для мха до 370 с для коры. При плотности лучистого теплового потока 15 кВт/м<sup>2</sup> воспламенение

исследуемых ЛГМ влажностью 10 % не происходит, не зависимо от времени теплового воздействия. С увеличением влажности ЛГМ до 30 % минимальная тепловая нагрузка для мха, опада сосновой хвои, еловой хвои и листы возрастает до 35 кВт/м<sup>2</sup>, а для мелких веток и коры до 40 кВт/м<sup>2</sup>.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют расширить существующий перечень горючих материалов с установленной критической плотностью лучистого теплового потока, что дает возможность повысить эффективность противопожарных мероприятий в природных экосистемах. При этом для ограничения возникновения и распространения горения по напочвенному покрову целесообразно обеспечить уровень воздействия на ЛГМ тепловой нагрузки, не превышающей 20 кВт/м<sup>2</sup>. Данный подход дает возможность определить надежную ширину противопожарных барьеров, в том числе для условий пожароопасных периодов, когда влажность ЛГМ составляет 10–30 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Арцыбашев, Е.С. Лесные пожары и борьба с ними / Е.С. Арцыбашев. – М. : Лесная промышленность, 1974. – 152 с.
- Барановский, Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения / Н.В. Барановский // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 8. – С. 34–37.
- Бельцова, Т.Г. Показатели воспламеняемости огнезащищенной древесины / Т.Г. Бельцова, О.Н. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – № 4. – С. 31–33.
- ГОСТ 30402-96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость. – Введ. 1997–03–30. – Минск : Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь : ФГУП ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1996. – 27 с.
- ГОСТ 16588-91. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. – Введ. 1991–12–28. – М. : Стандартинформ, 1991. – 8 с.
- ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – Введ. 1992–07.01. – М. : Гос. комитет по стандартизации : МВД СССР, 1991. – 80 с.
- Гришин, А.М. Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии / А.М. Гришин, В.П. Зима, В.Т. Кузнецов, А.И. Скорик // Физика горения и взрыва. – 2002. – № 1. – С. 30–35.
- Гусев, В.Г. Физико-математические модели распространения пожаров и противопожарные барьеры в сосновых лесах / В.Г. Гусев. – СПб. : СПбНИИЛХ, 2005. – 200 с.
- Кошмаров, Ю.А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. – М. : Внешторгиздат, 1987. – 444 с.



10. Кузнецов, Г.В. Пространственная постановка и численное исследование задачи о зажигании слоя лесного горючего материала нагретой до высоких температур частицей / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский // *Бутлеровские чтения*. — 2010. — № 12. — С. 30–37.
11. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
12. Ройтман, М.Я. Пожарная профилактика в строительстве / М.Я. Ройтман, Е.П. Комиссаров, В.А. Пчелинцев. — М.: Стройиздат, 1978. — 368 с.
13. СТБ 11.05.03-2010. Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования. — Введ. 2022-01-01. — Минск: Гос. комитет по стандартизации Респ. Беларусь: НИИ ПБ и ЧС МЧС Респ. Беларусь, 2010. — 76 с.
14. Усенья, В.В. Лесные пожары, последствия и борьба с ними / В.В. Усенья. — Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2002. — 206 с.
15. Babrauskas, V. Ignition Handbook / V. Babrauskas. — Issaquah: Fire Science Publishers, 2003. — 1118 p.
16. Benkorichi, S. Investigation of thermal degradation of pine needles using multi-step reaction mechanisms / S. Benkorichi, T. Fateh, F. Richard, J.L. Consalvi, A. Nadjai // *Fire Saf. J.* — 2017. — № 91. — P. 811–819.
17. Cruz, M.G. Ignition of crown fuels above a spreading surface fire / M.G. Cruz. — Missoula: University of Montana, 2004. — 126 p.
18. Dibble, A.C. Combustion characteristics of northeastern USA vegetation tested in the cone calorimeter: invasive versus noninvasive plants / A.C. Dibble, R.H. White, P.K. Lebow // *Int. J. Wildland Fire*. — 2007. — № 16. — P. 426–443.
19. Di Blasi, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis / C. Di Blasi // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2008. — № 34. — P. 47–90.
20. Fateh, T. Characterization of the burning behavior and gaseous emissions of pine needles in a cone calorimeter — FTIR apparatus / T. Fateh, F. Richard, B. Batiot, T. Rogaume, J. Luche, J. Zaida // *Fire Saf. J.* — 2016. — № 82. — P. 91–100.
21. Mehrabian, R. Effects of pyrolysis conditions on the heating rate in biomass particles and applicability of TGA kinetic parameters in particle thermal conversion modeling / R. Mehrabian, R. Scharler, I. Obernberger // *Fuel*. — 2012. — № 90. — P. 567–575.
22. Mindykowski, P. Piloted ignition of wildland fuels / P. Mindykowski, A. Fuentes, J.L. Consalvi, B. Porterie // *Fire Saf. J.* — 2011. — № 46. — P. 34–40.
9. Koshmarov Yu.A., Bashkirtsev M.P. Termodinamika i teploperedacha v pozharhom dele. Moscow, 1987, 444 p. (In Russian).
10. Kuznetsov G.V., Baranovskij N.V. Prostranstvennaya postanovka i chislennoe issledovanie zadachi o zazhiganii sloya lesnogo goryuchego materiala nagretoj do vysokikh temperatur chastitsej. *Butlerovskie chteniya*, 2010, no. 12, pp. 30–37. (In Russian).
11. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. Moscow, 1967, 600 p. (In Russian).
12. Rojtmán M.Ya., Komissarov E.P., Pchelintsev V.A. Pozharnaya profilaktika v stroitel'stve. Moscow, 1978, 368 p. (In Russian).
13. STB 11.05.03-2010. Sistema standartov pozharnoj bezopasnosti. Pozharnaya bezopasnost' tekhnologicheskikh protsessov. Metody otsenki i analiza pozharnoj opasnosti. Obshhie trebovaniya. Minsk, 2010, 76 p. (In Russian).
14. Usenya V.V. Lesnye pozhary, posledstviya i bor'ba s nimi. Gomel', 2002, 206 p. (In Russian).
15. Babrauskas V. Ignition Handbook. Issaquah: Fire Science Publishers, 2003, 1118 p.
16. Benkorichi S., Fateh T., Richard F., Consalvi J.L., Nadjai A. Investigation of thermal degradation of pine needles using multi-step reaction mechanisms. *Fire Saf. J.*, 2017. No. 91, pp. 811–819.
17. Cruz M.G. Ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Missoula, 2004, 126 p.
18. Dibble A.C., White R.H., Lebow P.K. Combustion characteristics of northeastern USA vegetation tested in the cone calorimeter: invasive versus noninvasive plants. *Int. J. Wildland Fire*, 2007, no. 16, pp. 426–443.
19. Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2008, no. 34, pp. 47–90.
20. Fateh T., Richard F. Batiot B., Rogaume T., Luche J., Zaida J. Characterization of the burning behavior and gaseous emissions of pine needles in a cone calorimeter — FTIR apparatus. *Fire Saf. J.*, 2016, no. 82, pp. 91–100.
21. Mehrabian R., Scharler R., Obernberger I. Effects of pyrolysis conditions on the heating rate in biomass particles and applicability of TGA kinetic parameters in particle thermal conversion modeling. *Fuel*, 2012, no. 90, pp. 567–575.
22. Mindykowski P., Fuentes A., Consalvi J.L., Porterie B. Piloted ignition of wildland fuels. *Fire Saf. J.*, 2011, no. 46, pp. 34–40.

Статья поступила в редакцию 18.05.2023

## REFERENCES

1. Artsybashev E.S. Lesnye pozhary i bor'ba s nimi. Moscow, 1974, 152 p. (In Russian).
2. Baranovskij N.V. Matematicheskoe modelirovanie zazhiganiya sloya lesnogo goryuchego materiala sfokusirovannym potokom solnechnogo izlucheniya. *Pozharovzryvbezopasnost'*, 2011, vol. 20, no. 8, pp. 34–37. (In Russian).
3. Bel'tsova T.G., Korol'chenko O.N. Pokazateli vosplamenyayemosti ognenezhashhishhennoj drevesiny. *Pozharovzryvbezopasnost'*, 2008, no. 4, pp. 31–33. (In Russian).
4. GOST 30402-96. Materialy stroitel'nye. Metod ispytaniya na vosplamenyayemost'. Minsk, 1996, 27 p. (In Russian).
5. GOST 16588-91. Piloproduktsiya i derevyannye detali. Metody opredeleniya vlazhnosti. Moscow, 1991, 8 p. (In Russian).
6. GOST 12.1.004-91. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaya bezopasnost'. Obshhie trebovaniya. Moscow, 1991, 80 p. (In Russian).
7. Grishin A.M., Zima V.P., Kuznetsov V.T., Skorik A.I. Zazhiganie lesnykh goryuchikh materialov potokom luchistoj ehnergii. *Fizika goreniya i vzryva*, 2002, no. 1, pp. 30–35. (In Russian).
8. Gusev V.G. Fiziko-matematicheskie modeli rasprostraneniya pozharov i protivopozharnye bar'ery v sosnovykh lesakh. St. Petersburg, 2005, 200 p. (In Russian).