

13. Zalesov S.V., Luganskiy N.A., Berezhnov V.A., Zalesova E.S. *Rubki ukhoda v proizvodnykh myagkolistvennykh molodnyakakh kak sposob formirovaniya sosnyakov na Yuzhnom Urale* [Thinning cuttings in derivatives of soft-leaved young growths as a method of formation of pine forests in the Southern Urals]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Bashkir State Agrarian University], 2013, no. 4, pp. 118-120. (In Russian).

### Сведения об авторах

*Иванчина Людмила Александровна* – аспирант кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru

*Залесов Вениамин Николаевич* – аспирант кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: Zalesov@usfeu.ru

*Залесова Евгения Сергеевна* – доцент кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, г. Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: Zalesov@usfeu.ru

### Information about authors

*Ivanchina Ludmila Aleksandrovna* – post-graduate Student, Forestry Chair, FGBOU VO "Ural State Forestry University", Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru

*Zalesov Veniamin Nikolayevich* – post-graduate student of the Forestry Department of the State Forestry University "Ural State Forestry University", Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: Zalesov@usfeu.ru

*Zalesova Evgenia Sergeevna* – Associate Professor of the Forestry Department of the Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education in the Urals State University of Forestry, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: Zalesov@usfeu.ru

DOI: 10.12737/article\_59c228bacea279.57488196

УДК 536.4

### О ВОЗНИКНОВЕНИИ ПОЖАРОВ В ЛЕСАХ ИЗ-ЗА ВОЗГОРАНИЯ ЛЕСНОГО ОПАДА

кандидат технических наук, профессор **А.М. Зайцев**<sup>1</sup>

студент **С.В. Губский**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация

Пожары в лесах наносят большой экологический ущерб нашей стране за счет потери древесины, уничтожения и повреждения жилых и производственных зданий и сооружений. Часто пожары в лесах сопровождаются гибелью людей. Крупные пожары влияют на загрязнение атмосферы, изменение климата на определенной территории, в целом оказывают отрицательное влияние на экологию пострадавших регионов, увеличивают показатели заболеваемости и смертности населения, создают социальную напряженность. В работе анализируются причины антропогенного и природного происхождения пожаров. Главное внимание уделено условиям самовозгорания лесной подстилки (опада) в хвойных лесах, которое может произойти при определенных условиях, даже в зимний период, после выпадения снега. Представлено физико-химическое обоснование процесса самовозгорания лесного опада, произведены соответствующие теплофизические расчеты. Показано, что в слое подстилки определенной толщины происходит процесс самонагревания и подъем температуры за счет экзотермической реакции, из-за чего в подстилке повышается температура – вплоть до температуры самовозгорания. Такая картина будет наблюдаться до тех пор, пока не будет достигнута некоторая температура самонагревания, при которой начнутся экзотермические превращения в материале (разложение, окисление), ведущие к самона-

греванию материала. При достижении определенной температуры может произойти самовоспламенение лесной подстилки. Рассмотрены конкретные примеры самовозгорания лесной подстилки в хвойных лесах Воронежской области в начале зимы под слоем снега и возможные причины самовозгорания хвойной подстилки в лесах в летний период. Показано, что процесс самовозгорания может произойти при сочетании определенных климатических условий, а также таких факторов, как толщина, влажность и дисперсное состояние, теплофизические характеристики опада, температура и подвижность атмосферы. На основе решения уравнения нестационарной теплопроводности Фурье с внутренним источником тепловыделения планируется определение условий теплообмена на поверхности и толщины опавшего слоя опада, в котором может произойти процесс самовозгорания.

**Ключевые слова:** лесные пожары, самовозгорание опада в летний и зимний период под слоем снега, климатические условия, низовые пожары, тление, физико-химический процесс самовозгорания, уравнение нестационарной теплопроводности Фурье с внутренним источником тепловыделения.

### ABOUT THE EFFECTS OF FIRES IN FORESTS BECAUSE OF FIRE REDUCTION

Candidate of Technical Sciences, Professor **A.M. Zaitsev**<sup>1</sup>

Student **S.V. Gubskiy**<sup>1</sup>

1 – Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

#### Abstract

Fires in forests cause great environmental damage to our country due to loss of wood, destruction and damage to residential and industrial buildings and structures. Often fires in forests are accompanied by death of people. Large fires affect the pollution of the atmosphere, climate change in a certain area, generally have a negative impact on the environment of the affected regions, increase incidence and mortality rates of the population, create social tension in society. The paper analyzes the causes of anthropogenic and natural origin of fires. The main attention is paid to the conditions of spontaneous combustion of forest litter (litter) in coniferous forests, which can occur under certain conditions, even in winter, after snowfall. A physicochemical justification for the process of spontaneous combustion of forest litter is presented, and corresponding thermophysical calculations are made. It is shown that in the layer of litter of a certain thickness, a process of self-heating takes place and an increase in temperature due to an exothermic reaction, because of which the temperature rises in the litter - up to the temperature of spontaneous combustion. Such a picture will be observed until a certain self-heating temperature is reached at which the exothermic transformations in the material (decomposition, oxidation) begin, leading to self-heating of the material. When a certain temperature is reached, self-ignition of the forest litter may occur. Specific examples of spontaneous combustion of forest litter in coniferous forests of the Voronezh region in the beginning of winter under a layer of snow and possible causes of spontaneous combustion of coniferous litter in forests during the summer are considered. It is shown that the process of spontaneous combustion can occur when certain climatic conditions are combined, as well as factors such as thickness, humidity and dispersed state, and the thermophysical characteristics of the litter, temperature and mobility of the atmosphere. Based on the solution of the equation of non-stationary Fourier thermal conductivity with an internal heat source, it is planned to determine the conditions for heat exchange on the surface and the thickness of the fallen layer of litter, in which a self-ignition process may occur.

**Key words:** forest fires, spontaneous combustion of litter in summer and winter under a layer of snow, climatic conditions, grass-roots fires, smoldering, physicochemical process of spontaneous combustion, equation of non-stationary Fourier thermal conductivity with an internal source of heat release.

Россия – самая большая по площади страна в мире, примерно пятая часть ее занята лесами. Ежегодно в России регистрируется от 10 тыс. до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от

500 тыс. до 2,5 млн га. По данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат), всего с начала 1992 года по конец 2014 года в России произошло 589 768 лесных пожаров [1].

По данным Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз), в среднем размер ущерба от лесных пожаров в год составляет около 20 млрд р., из них от 3 до 7 млрд – ущерб лесному хозяйству (потери древесины). Обычно возгорания лесов в России начинаются в апреле и длятся до октября. При этом горят нижние части деревьев, трава, валяжник, подлесок, выступающие корни. Скорость распространения низового пожара составляет 2,5-3,0 м/мин. К ним можно отнести и почвенные пожары, возникающие в местах нахождения торфа, древесного грунта и иного лесного горючего материала. Скорость распространения такого пожара – несколько метров в сутки. При этом выделяется большое количество дыма [1].

В июле-августе 2010 года на всей территории европейской части страны из-за малоподвижного антициклона установилась аномальная жара, рекордная за более чем 130-летнюю историю метеонаблюдений. Во многих регионах РФ температура воздуха приближалась к 40-градусной отметке или превысила этот показатель. Из-за экстремальной жары ухудшилась экологическая обстановка, активизировались торфяные и лесные пожары: всего было зафиксировано 34 812 очагов природных пожаров общей площадью около 2 млн га, в том числе более 1 тыс. торфяных. По данным МЧС России, всего от пожаров и вызванного ими смога пострадали 17 регионов, более 2,5 тыс. семей остались без крова, более 60 человек погибли в огне и от отравления продуктами горения. Общий ущерб был оценен в 85,5 млрд р. [1].

Пожары наносят огромный экономический ущерб, оказывают негативное влияние на экологию пострадавших регионов. Крупные пожары влияют на изменение климата, загрязняя атмосферу. Так, по данным [2], летом 2010 года в европейской части России выброшено в атмосферу более 100 млн тонн углекислого газа, 300 млн тонн CO<sub>2</sub> поступило в атмосферу в результате ускоренного разложения поврежденной огнем биомассы, огромное количество взвешенных в воздухе сажи, золы и других вредных веществ. Эмиссия углерода продолжается долгие годы после пожаров. В течение 20-30 лет вследствие разложения органического вещества в почве теряется до 20 % почвенного углерода.

В период пожаров в городах, например в Москве, отмечалось увеличение показателя смертности населения по сравнению с аналогичными летними пожарами предыдущих лет на 15-20 %. Вследствие загрязнения атмосферы продуктами горения, термического разложения, устоявшегося смога, например, в Москве умерли десятки тысяч жителей – как правило, люди с проблемами органов дыхания [1-4]. Осенью 2014 г. в воронежских лесах горела подстилка под слоем снега. Такое природное явление наблюдалось под Нововоронежем и в окрестностях села Хреновое Бобровского района [5].

Причины возникновения пожаров в лесах имеют как антропогенное, так и природное происхождение. К природным причинам можно отнести молнии, сухие грозы, вулканическую деятельность, разломы земной коры; также в литературе отмечаются случаи возникновения пожаров от метеоритов (например, Тунгусский метеорит). Пожары могут возникнуть по причине самовозгорания, например торфа, древесины, угля и других полезных ископаемых, а также по причине самовозгорания лесной подстилки.

Данная работа посвящена причинам возникновения пожаров за счет самовозгорания лесной подстилки. Одной из причин выполнения данной работы послужило сообщение по Воронежскому телевидению о возникновении пожаров в сосновых лесах под Воронежем в начале зимы после выпадения первого снега. Работники телевидения отсняли документальный материал о возникновении пламени в лесной подстилке, покрытой снегом, при прохождении егеря на определенной территории, когда в результате прохождения человека снимался слой снега и возникало пламя.

На рис. 1-2 показаны фрагменты передачи [6-7], когда происходило возгорание лесной подстилки после прохождения человека и освобождения подстилки от снежного покрова. Нами была поставлена задача определения причины возникновения открытого пламени при возгорании лесной подстилки при прохождении лесника по заснеженному лесу.

Прежде всего необходимо отметить, что погодные условия осенью не отличались дождливыми условиями и лесная подстилка, как и почва, на-



Рис. 1-2. Фрагменты передачи, когда происходило возгорание лесной подстилки после прохождения человека и освобождения подстилки от снежного покрова

ходила в сухом состоянии. В результате наступившего похолодания выпал снег, который накрыл подстилку как бы легким покрывалом, выполняющим функцию теплоизоляции и предотвращающим снос тепла с подстилки, в которой происходил процесс самонагрева. Дело в том, что с точки зрения теплофизики многие органические материалы при определенных условиях склонны к самовозгоранию. Можно привести многочисленные примеры из популярной и научной литературы о самовозгорании хлопка в тюках, угля на складах, отложившейся пыли на зернохранилищах, элеваторах, торфа на предприятиях по его использованию и в естественных условиях [8-11].

Представим, что в слое подстилки определенной толщины происходит процесс самонагрева и подъем температуры за счет экзотермической реакции. При окислении и разложении органического вещества происходит выделение энергии в результате экзотермической реакции (где избыток энергии при образовании новых связей выделяется в виде тепла), из-за чего в подстилке повышается температура – вплоть до температуры самовозгорания. На рис. 3 представлены возможные варианты нагрева подстилки до определенной температуры. При весьма умеренной скорости реакции (кривая 1) в материале не происходит существенных изменений, и температура не достигает температуры ускорения реакции самонагрева. В этом случае при определенных условиях материал может вер-

нуться в первоначальное состояние. Такая картина будет наблюдаться до тех пор, пока не будет достигнута некоторая начальная температура самонагрева  $t_{сн}$ , при которой начнутся экзотермические превращения в материале (разложение, окисление), ведущие к самонагреванию материала (кривая 2), в процессе которого возможны две ситуации [9]:

1) интенсивность самонагрева невелика, и материал после «исчерпания» способных окисляться компонентов охладится до первоначальной температуры (кривая 2);

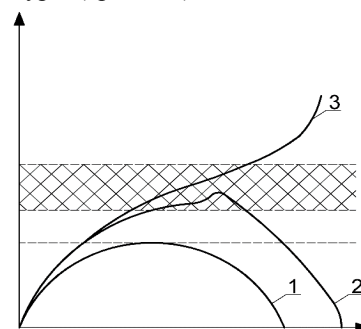


Рис.3 Схема теплового самовозгорания

2) в результате самонагрева будет достигнута температура самовозгорания  $t_{св}$ , начиная с которой произойдет спонтанный рост скорости реакции и температуры, что приводит к возникновению открытого горения (кривая 3). Эта температура называется критической температурой и определяется по уравнению (1) [9, 12]

$$t_{кр} = t_0 + \frac{1}{\delta} \ln \frac{x_{кр}^2 \alpha C_y}{R^2 c_q \delta u_0} \quad (1)$$

где  $x_{кр}$  – критериальный параметр развития очага самонагрева;  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C_y$  – удельная теплоемкость,  $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ ;  $R$  – толщина слоя подстилки,  $\text{м}$ ;  $c$  – концентрация кислорода в воздухе, соприкасающаяся с веществом;  $q$  – тепловой эффект окисления,  $\text{ккал}/\text{м}^3$ ;  $\delta$  – постоянная,  $\text{град}^{-1}$ ;  $u_0$  – соответствующие этой температуре начальные значения скорости сорбции.

При достижении определенной температуры и условий теплообмена с окружающей средой может произойти самовоспламенение лесной подстилки. Температурой самовоспламенения называется наименьшая температура вещества (или его оптимальной смеси с воздухом), при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, приводящее к возникновению пламенного горения [12-13].

В табл. 1 представлены значения температуры самонагрева и самовозгорания некоторых материалов, близких по теплофизическим характеристикам к лесному опаду [12]. Температуру самовозгорания лесной подстилки можно определить на основе [3]. Возможность самовозгорания материалов, нагретых до температур промежуточной области температуры самонагрева и температуры самовоспламенения, является потенциально опасной и рассчитывается с помощью системы следующих уравнений [3].

Учитывая это, вычислим температуру самовозгорания и время нагрева до самовоспламенения по формулам (2, 3) соответственно:

$$lgt = A_p + n_p \cdot lgS, \quad (2)$$

$$lgt = A_g - n_g \cdot lg\tau, \quad (3)$$

где  $S$  – удельная поверхность опытного образца,  $\text{м}$ ;  $\tau$  – время нагрева образца,  $\text{ч}$ ;  $t$  – температура  $^{\circ}\text{C}$ ;  $A_p, A_g, n_p, n_g$  – безразмерные опытные константы (см. табл. 2) [3], которые позволяют определить температуру самовозгорания и время нагрева до температуры самовозгорания. Температуру самовозгорания лесной подстилки можно определить исходя из следующих соображений [9]. Примем, что в лесном опаде преобладают сосновые иголки. Поэтому произведем расчет вероятной температуры самовоспламенения пласта сосновых иголок. Примем, что размер пласта равен  $0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,2 \text{ м}$ . Поэтому удельная поверхность будет равна (4) [16]

$$S = 30 \text{ м}. \quad (4)$$

На основании формулы (2) определяем минимальную температуру подстилки, при которой может произойти ее самовозгорание, для чего в формулу (2) подставляем значения полученной величины  $S$ , а также опытные константы из табл. 2. В результате получим следующее уравнение:

$$lgt = 1,885 - 0,0219 \cdot lg30 = 1,85.$$

Решая полученное уравнение относительно  $t$ , получим, что минимальная температура самовозгорания сосновой подстилки составляет  $70,79^{\circ}\text{C}$ .

Зная величину температуры, при которой происходит самовозгорание, по формуле (3) можно определить время от начала развития экзотермической реакции с выделением тепла до возможного момента времени самовозгорания, в идеальных условиях, когда отсутствует теплоотдача тепла от хвойного опада в атмосферу потоками воздуха, оно составляет 192 ч [16].

Таблица 1

Температура самонагрева и самовозгорания некоторых материалов

Материал	$t_{сн}$	$t_{своз}$
Торф (фрезерный)	70	225
Уголь бурый	50-65	150-250
Сено (влажность 7,5 %)	70	204
Силос (зеленые части растений)	70	265
Хлопок	60	205
Опилки сосновые	80	230 (влажность 30-40 %)

Значения констант для некоторых горючих материалов

	$A_p$	$A_b$	$n_p$	$n_b$
Опилки сосновые	1,855	2,296	0,219	0,096
Плита торфяная	1,760	2,271	0,248	0,117
Сено	2,103	2,311	0,109	0,058
Солома пшеничная	2,185	2,301	0,067	0,035

Необходимо отметить, что проведенный расчет имеет приближенное значение, потому что процесс самонагрева хвойного опада до температуры самовоспламенения может затянуться на гораздо более длительное время, поскольку в процессе нагревания происходит значительный съем тепла на поверхности подстилки за счет конвекции воздушного потока, что не позволяет достигнуть температуры самовоспламенения. При выпадении снега потеря тепла в атмосферу прекратилась, и процесс самонагрева до критической температуры увеличился.

Так снежный покров или же свежий еловый опад создают хорошие условия для аккумуляции тепла: чем меньше рассеивается тепло, тем при более коротком промежутке времени начинается процесс самовозгорания. Увеличение толщины подстилки повышает вероятность его самовозгорания.

Выпавший снег представляет собой «снежное покрывало» с очень высокими теплозащитными свойствами. Теплоемкость снега ( $c$ ) очень мала и составляет 2,093 кДж/кг · град [14] (см. рис. 4).

Теплозащитные свойства снежного покрова определяются величиной его термического сопротивления  $R_s$ , равного отношению высоты снежного

покрова  $h_s$  к коэффициенту эффективной теплопроводности снега  $\lambda_s$ , который зависит от плотности, структуры и температуры снега [6]

$$R_s = \frac{h_s}{\lambda_s} \quad (5)$$

Согласно данным Воронежского Гидрометцентра 2014 г., высота снежного покрова на 29 ноября составила 5 см [6], а температура воздуха 2 декабря, когда было зафиксировано данное явление, составила  $-5^\circ\text{C}$  [7].

Температура грунта и воздуха перед выпадением снега была положительная, с наступлением холодов температура грунта оставалась положительной под слоем лесной подстилки и снежным покрывалом.

По данным [5-6], коэффициент теплопроводности и термическое сопротивление снега составит

$$\lambda_s = 0,1247 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$R_s = \frac{h_s}{\lambda_s} = \frac{0,05}{0,1247} = 0,4 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

При тлении и последующем горении органического вещества выделяется теплота, называемая теплотой сгорания. Используя уравнение Д.И. Менделеева, определим низшую теплоту сгорания по формуле (6) [15]:

$$Q_H^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P) - 25W^P, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (6)$$

Теплота сгорания – это количество выделившейся теплоты при полном сгорании массовой единицы вещества, определяется химическим составом горючего вещества, химические элементы в котором обозначаются принятыми символами С, Н, О, N, S, а зола и вода – символами А и W соответственно. В состав горючего вещества сосновой подстилки входит [11]:

горючая часть: С = 35 %, Н = 6,5 %, N = 1 %, О = 41,63 %, S = 0,05 % [16];  
– балласт: W = 14,36 % [10], А = 1,46 % [9].

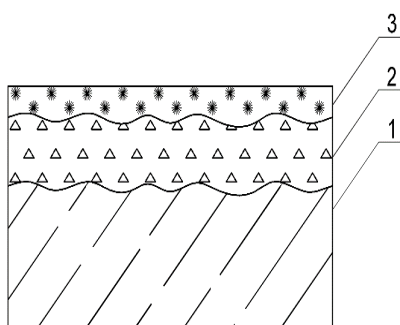


Рис. 4 Схема лесной подстилки с выпавшим снегом: 1 – грунт (супесь), 2 – сосновый опад, в котором происходит процесс самовозгорания; 3 – выпавший снег

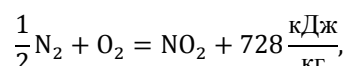
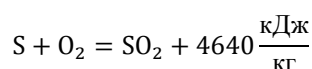
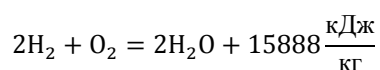
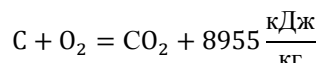
$$Q_H^P = 339 \cdot 35 + 1030 \cdot 6,5 - 109(41,63 - 0,05 - 25 \cdot 14,36) = 22733 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Влажность оказывает значительное воздействие на величину низшей теплоты сгорания, так как испарение воды требует затрат энергии. Органические вещества являются термически нестойкими и при повышении температуры начинают разлагаться с выходом из них горючих и негорючих газов [16].

Т. к. защитное покрытие препятствует теплообмену, примем, что сосновая подстилка достигла температуры самовозгорания, и рассчитаем для нее термохимическое уравнение. Т. к. лесная подстилка содержит в своей структуре несколько химических элементов, то уравнение теплового эффекта запишем для каждой реакции отдельно. Для перевода значения энтальпии горения из кДж/моль в кДж/кг воспользуемся формулой (7), молярную массу веществ определим по [8]:

$$Q = \frac{1000 \cdot |\Delta H|}{M}, \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right]. \quad (7)$$

Суммируя расчетные значения тепла,



выделяющиеся при тлении, получим, что при тлении лесной подстилки выделяется 30211 кДж/кг теплоты на килограмм органического вещества. А низшая температура сгорания лесной подстилки составляет 22733 кДж/кг, т. е. выделяющейся при самонагревании энергии достаточно для самовоспламенения подстилки.

Однако для воспламенения и последующего горения необходимо поступление кислорода. Поэтому, когда лесник, шагая по лесу и не задумываясь, разгребал ногами снег и открыл доступ кислорода к тлеющей подстилке, то, естественно, произошло возгорание. Это явление впоследствии лесник повторил в присутствии работников телевидения, что и было зафиксировано телевизионной камерой [5].

Данный материал может служить демонстрационным не только для лесников, специалистов, занимающихся надзорной деятельностью по линии пожарной безопасности, а также для научных работников, исследующих процессы самовозгорания органических и ископаемых материалов при различных климатических воздействиях. Приведенное выше исследование можно распространить и на леса, в которых подстилка может самовозгораться и в летний период при определенных климатических условиях (рис. 5).

На рис. 6 представлена схема возможного возгорания подстилки в летний период. В этом случае роль защитного покрывала (барьера для теплообмена) могут выполнять свежие опавшие иголки, листья, кора и прочий опад.



Рис. 5. Самовозгорание лесной подстилки

Удельная теплоемкость опада определяется по выражению (8) [15]

$$c = 0,374 + 0,00066 \cdot t, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \quad (8)$$

В пределах изменения температуры от 0 до 100 °С удельная теплоемкость абсолютно сухой подстилки равна от 1,56 до 1,84 кДж/(кг·град) и в среднем равна 1,67 кДж/кг·град. При увлажнении теплоемкость опада увеличивается, так как удельная теплоемкость воды (4,18 кДж/(кг·град)) больше теплоемкости абсолютно сухой подстилки.

При положительной температуре (выше 0 °С) влияние влажности сказывается в большей мере, чем при отрицательной температуре. Например, увеличение влажности с 10 до 100 % при температуре + 20 °С приводит к повышению теплоемкости на 70 %. Значение теплоемкости подстилки при разной температуре и влажности можно определить, используя [15].

С увеличением плотности теплопроводность подстилки возрастает. Так как теплопроводность

воды при одинаковой температуре в 23 раза меньше теплопроводности воздуха, теплопроводность подстилки в сильной мере зависит от влажности, увеличиваясь, с ее возрастанием. С увеличением температуры теплопроводность подстилки возрастает, причем это увеличение в большей мере выражено у влажной подстилки.

Под действием солнечных лучей влажность свежего опада уменьшается, соответственно, уменьшается ее влияние на скорость экзотермической реакции, температура свежего опада также повышается, и при легком дуновении ветра возникает открытое пламенное горение вследствие поступления достаточного количества кислорода.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод, что одной из важных причин возникновения пожаров в лесах (особенно хвойных) является самовозгорание лесной подстилки, протекающее в двух стадиях самонагревания: одна связана с жизнедеятельностью термофильных бактерий, а вторая является результатом начавшегося процесса саморазложения вещества.

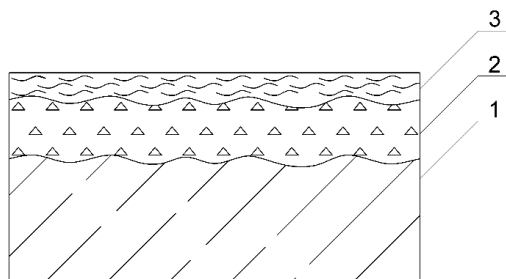


Рис. 6. Схема лесной подстилки со свежим опадом: 1 – грунт (супесь); 2 – сосновый опад, в котором происходит процесс самовозгорания; 3 – теплоизоляционный свежий опад

Самонагревание скоплений лесной подстилки при температурах до 70-75 °С [12] происходит преимущественно в результате жизнедеятельности микроорганизмов, а также окисления легко окисляющихся продуктов их жизнедеятельности и восстановленных веществ, которые накапливаются в анаэробных условиях. При температуре, превышающей 75 °С, опад в течение нескольких дней превращается в полукокс (способ переработки твёрдых топлив нагреванием без доступа воздуха

до 500-550 °С), способный энергично взаимодействовать с кислородом воздуха. Поэтому дальнейшее повышение температуры лесной подстилки происходит преимущественно в результате его окисления кислородом и приводит к самовозгоранию.

Под критическими размерами скоплений (толщиной) самовозгорающихся материалов подразумеваются такие размеры, при которых процесс самонагревания, вызванный окислением, приводит, в конечном счете, к воспламенению и горению.

Формы скопления могут быть весьма разнообразны, поэтому сравнивать их критические размеры имеет смысл лишь для определенной формы скопления. Особый интерес представляют слоистые накопления, наиболее часто встречающиеся на практике, и с которыми удобнее всего сравнивать скопления других форм.

Минимальную толщину слоя лесного опада можно определить, исходя из решения уравнения нестационарной теплопроводности Фурье с равномерно распределенным по толщине источником тепловыделения. Температурное поле в слоевом скоплении окисляющегося материала с источником тепловыделения определяется из решения следующего уравнения [17]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{\gamma C} f(t, C_k), \quad (9)$$

где  $\alpha$  – эффективный коэффициент теплопроводности для данного материала, м<sup>2</sup>/с;  $\gamma$  – плотность скопления опада, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – теплоемкость скопления, Дж/кг град;  $f(t, C_k)$  – удельная мощность тепловыделения, Вт/м<sup>3</sup>;  $C_k$  – действующая концентрация кислорода.

Для решения уравнения (9) необходимо задать начальное и граничные условия. Если в начальный момент времени температура во всех точках скопления равна  $t_0$ , а с поверхности скопления осуществляется свободный теплообмен с окружающей средой, то уравнение (9) следует рассматривать при следующих начальном и граничных условиях:

$$t|_{\tau=0} = t_0; \quad (10)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} - \alpha(t - t_0)|_{x=0}; \quad \lambda \frac{\partial t}{\partial x} + \alpha(t - t_0)|_{x=h} = 0, \quad (11)$$

где  $\lambda$  – коэффициент эффективной теплопроводности скопления, Вт/м-град;  $\alpha$  – коэффици-



ент теплоотдачи тепла в атмосферу, Вт/м<sup>2</sup> град;  
 $h$  – толщина скопления материала, м.

Из решения системы уравнений (9)-(11) можно получить аналитическую формулу, характеризующую температурное поле в слое опада, изменяющуюся со временем, а затем из полученного решения и минимальную толщину хвойного опада, при которой может произойти его самовозгорание.

В заключение отметим, что в результате проведенного нами исследования:

– определена причина самовозгорания лесной подстилки в начальный период зимы под слоем снега;

– показано, что самовозгорание может произойти и в летний период при определенном со-

стоянии температуры и влажности атмосферы, почвы и лесной подстилки;

– намечены пути и поставлена теплофизическая задача для определения минимальной толщины лесной подстилки и время, в течение которого может произойти ее самовозгорание.

При подготовке работы к публикации использовались материалы следующих исследований [17-21].

### Библиографический список

1. Лесные пожары в России. Досье. / ТАСС – информационное агентство России [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – <http://tass.ru/info/1121375>. – Загл. с экрана.
2. Смирнов А.П. Лесные пожары – 2010 [Текст] / А.П. Смирнов // Безопасность жизнедеятельности. – 2013. – №11. – С. 13-16.
3. Седнев В.А. Защита населенных пунктов от крупномасштабных лесных пожаров [Текст] / В.А. Седнев, Н.В. Тетерина // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 2. – С. 14-18.
4. Корнилов А.А. Риск воздействия лесного пожара на населенный пункт [Текст] / Корнилов А.А., Гапоненко Л.Б., Голубев А.В. // Техносферная безопасность. – 2016. – № 2 (11). – С. 66- 74.
5. Лесники озадачены природным явлением: лесная подстилка горит под снегом/ ГТРК "Воронеж" [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – <http://www.vesti.ru/doc.html?id=2171191&cid=17>. – Загл. с экрана.
6. Воронеж – климатические итоги осени / Gismeteo – прогноз погоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа. - <https://www.gismeteo.ru/news/klimat/12664-voronezh-mdashklimaticheskie-itogi-oseni/>. – Загл. с экрана.
7. Дневник погоды в Воронеже за декабрь 2014 г. / Gismeteo – прогноз погоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – <https://www.gismeteo.ru/diary/5026/2014/12/>. – Загл. с экрана.
8. Молярная масса / Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – [https://ru.wikipedia.org/wiki/Молярная\\_масса](https://ru.wikipedia.org/wiki/Молярная_масса). – Загл. с экрана.
9. Баратов А.Н. Пожарная безопасность. Учебное пособие [Текст] / А.Н. Баратов, В.А. Пчелинцев – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 144 с.
10. Осокин Н.И. К оценке влияния изменчивости характеристик снежного покрова на промерзание грунтов [Текст] / Н.И. Осокин, Р.С. Самойлов, А.В. Сосновский // Криосфера Земли. – 1999. – Т. III. – № 1. – С. 3–10.
11. Карауш С.А. Расчет параметров процессов горения: учебное пособие [Текст] / С.А. Карауш. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 120 с.
12. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. [Текст] / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко – М. : «Пожнаука», 2004. – 713 с.
13. Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности. Справочник [Текст] / под. общ. ред. И. В. Рябова. – М. : «Химия», 1970. – 321 с.
14. Чубкин И.А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов [Текст] / И.А. Чубкин, А.М. Маслов. – М. : Пищевая промышленность, 1970. – 205 с.

15. Большая советская энциклопедия : в 30 т. [Текст] / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М. : Сов. энцикл., 1969-1978. – Т. 30.
16. Зайцев А.М. Выход токсичных летучих веществ из отделочных строительных материалов на ранней стадии пожара [Текст] / А. М. Зайцев, А.В. Заряев, А.Н. Лукин, О.Б. Рудаков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2011. №3-4. С. 127-133.
17. Крикунов Г.Н. О критических размерах скоплений самовозгорающихся материалов [Текст] / Г.Н. Крикунов, А.М. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 1977. – № 8. – С. 45-49.
18. Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности. Справочник [Текст] / под. общ. ред. И. В. Рябова. – М.: «Химия», 1970. – 336 с.
19. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли [Текст] / А.Я. Корольченко. – М.: «Химия», 1986. – 216 с.
20. Зайцев А.М. Метод расчета прогрева многослойных конструкций путем приведения их к однослойной пластине на основе модифицированного уравнения нестационарной теплопроводности Фурье [Текст] / А.М. Зайцев // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15. – № 3. – С. 55-61.
21. Зайцев А. М. Особенности учета начальной стадии пожара при расчете прогрева строительных конструкций [Текст] / А.М. Зайцев, В.А. Болгов // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2015. – № 2(15). – С. 7-14.

### References

1. Forest fires in Russia. Dossier. / TASS - RussianNewsAgency[Electronic resource]. - Access mode. – <http://tass.ru/info/1121375>. – Ver. From the screen.
2. Smirnov A.P. Forest fires – 2010 [Text] / A.P. Smirnov // Life safety. – 2013. – p. 13-16.
3. Sednev V.A. Protection of human settlements from large-scale forest fires [Text] / V.A. Sednev, N.V. Teterina // Fires and emergencies: prevention, elimination. - 2016. - № 2. – P. 14-18.
4. Kornilov A.A. The risk of exposure to forest fire on a populated area [Text] / Kornilov A.A., Gaponenko L.B., Golubev A.V. // Technospheric security. - 2016. - № 2 (11). – P. 66-74.
5. Foresters are puzzled by the natural phenomenon: the forest litter burns under snow / GTRC "Voronezh" [Electronic resource]. - Access mode. - <http://www.vesti.ru/doc.html?id=2171191&cid=17>. - Ver. From the screen.
6. Voronezh - climatic results of autumn / Gismeteo - weather forecast [Electronic resource]. - Access mode. - <https://www.gismeteo.ru/news/klimat/12664-voronezh-mdashklimaticheskie-itogi-oseni/>. - Ver. From the screen.
7. Weather Diary in Voronezh for December 2014 / Gismeteo - weather forecast [Electronic resource]. - Access mode. - <https://www.gismeteo.ru/diary/5026/2014/12/>. - Ver. From the screen.
8. Molar mass / Wikipedia - the free encyclopedia [the Electronic resource]. - Access mode. - [https://ru.wikipedia.org/wiki/Molar\\_Mass](https://ru.wikipedia.org/wiki/Molar_Mass). - Ver. From the screen.
9. Baratov A.N. Fire safety. Textbook manual [Text] / A.N. Baratov, V.A. Pchelintsev – М. -The Association of Construction Universities, 2006. – 144 p.
10. Osokin N.I. To an assessment of the effect of snow cover variability on soil freezing [Text] / N.I. Osokin, R.S. Smoylov, A.V. Sosnovskiy // Cryosphere of the Earth. – 1999. – Т. S. - № 1. – P. 3-10.
11. Karaush S.A. Calculation of the parameters of combustion processes: a textbook [Text] / S.A. Kraush. – Tomsk : Publishing house of Tomsk State Architectural and Building University, 2015. – 120 p.
12. Korolchenko A.Y. Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing agents. Handbook: in 2 parts [Text] / A.Y. Korolchenko, D.A. Korolchenko – М. – “Fire science”, 2004. – 713 p.
13. Fire hazard of substances and materials used in the chemical industry. Handbook [Text] / under the general editorship of I.V. Ryabova. – М. : “Chemistry”, 1970. – 321 p.

14. Chubkin I.A. Handbook of thermophysical characteristics of food and semi-finished products [Text] / I.A. Chubkin, A.M. Maslov. – М.: Food industry, 1970. – 205 p.
15. Great Soviet Encyclopedia: 30 tons. [Text] / Ch. Ed. A.M. Prokhorov. - 3rd ed. - М.: Sov. Encycl., 1969-1978. – Т. 30.
16. Zaitsev A.M. The release of toxic volatile substances from the finishing building materials at an early stage of the fire [Text] / A.M. Zaitsev, A.V. Zaryayev, A.N. Lukin, O.B. Rudakov // Scientific herald of Voronezh State Architectural and Construction University. Series: Physicochemical problems and high technologies of building materials science. 2011. №3-4. P. 127-133.
17. Krikunov GN On the critical dimensions of clusters of self-igniting materials [Text] / G.N. Krikunov, A.M. Zaitsev // News of Higher Educational Establishments. Mountain magazine. - 1977. - № 8. – P. 45-49.
18. Fire hazard of substances and materials used in the chemical industry. Handbook [Text] / under the general editorship of I.V. Ryabova. – М.: "Chemistry", 1970. – 336p.
19. Korolchenko A.Y. Fire and explosion hazard of industrial dust [Text] / A.Y. Korolchenko. – М.: "Chemistry", 1986. – 216p.
20. Zaitsev A.M. The method for calculating the heating of multilayer structures by bringing them to a single-layer plate based on the modified equation of the time-dependent Fourier thermal conductivity [Text] / A.M. Zaitsev // Fire and explosion safety. – 2006. – Т.15. - № 3. – P. 55-61.
21. Zaitsev A.M. Peculiarities of taking into account the initial stage of a fire when calculating the heating of building structures [Text] / A.M. Zaitsev, V.A. Bolgov // Bulletin of the Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia. - 2015. - №2 (15). – P. 7-14.

### Сведения об авторах

*Зайцев Александр Михайлович* – профессор, кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной и промышленной безопасности ВГТУ «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российской Федерации; email: zaitsev856@yandex.ru.

*Губский Сергей Владимирович* – студент кафедры пожарной и промышленной безопасности ВГТУ «Воронежский государственный технический университет» г. Воронеж, Российской Федерации; email: gubskiy.sergey@yandex.ru.

### Information about authors

*Zaitsev Alexander Mikhailovich* – professor, candidate of technical sciences, associate professor of Fire and Industrial Safety Department of VSTU «Voronezh State Technical University», Voronezh, Russian Federation; Email: zaitsev856@yandex.ru.

*Gubskiy Sergey Vladimirovich* – a student of the Department of Fire and Industrial Safety of VSTU "Voronezh State Technical University", Voronezh, Russian Federation; Email: gubskiy.sergey@yandex.ru.