

*Д.И. Савельев, адъюнкт, НУГЗУ,
С.Н. Бондаренко, к.т.н., доцент, НУГЗУ,
А.А. Киреев, д.т.н., доцент, НУГЗУ,
К.В. Жерноклев, к.х.н., доцент, зам. нач. каф., НУГЗУ*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ ОГNETУШАЩИХ СОСТАВОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ХВОЙНОЙ ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКЕ

Проведены экспериментальные исследования огнезащитного действия гелеобразующей системы ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) по отношению к хвойной лесной подстилке. Получено регрессионное уравнение описывающее влияние концентрации компонентов системы, массы нанесенного покрытия и времени сушки обработанного лесного горючего материала на время её воспламенения.

Ключевые слова: тушение лесных пожаров, низовые лесные пожары, лесная подстилка, гелеобразующие системы, раздельно-последовательная подача, огнезащита, химические опорные полосы.

Постановка проблемы. Лесные пожары наносят большой ущерб экономикам многих государств. Особенно опасны лесные пожары в засушливый период, когда создаются благоприятные условия для горения сухого лесного горючего материала, для чего требуются значительные силы и средства для их тушения.

Тушение лесных пожаров делится на две последовательно выполняемые тактические операции: локализацию очага пожара и ликвидацию горения. В случае лесных пожаров дополнительно проводят дотушивание очагов горения, оставшихся внутри пожарища и окарауливание участка, где был пожар.

Основные способы тушения пожаров: захлестывания или забрасывание почвой кромки пожара; устройство заградительных и минерализованных каналов и полос; тушения пожара водой или растворами огнетушащих химикатов, отжиг (пуск встречного огня) и др. [1].

По статистике, количество низовых лесных пожаров значительно преобладают над верховыми, а верховые пожары возникают из низовых как последующая стадия их развития, причем низовой пожар является составной частью верхового пожара. Возгорание крон деревьев без низового пожара – редкое исключение, например от пожара в рядом стоящего здания [2].

Для тушения низового пожара высокой интенсивности, его останавливают пуском отжига навстречу фронта от опорной полосы, созданной с помощью засыпки грунтом либо растворами химикатов. Отжиг производят от опорной полосы, проложенной на расстоянии не менее 80 м от фронта. На флангах и в тылу лесного пожара создают заградитель-

ную минерализованную полосу без этапа отжига [3].

В случае создания опорных и заградительных полос время огнезащитного действия является основным показателем эффективности, при этом основную роль играют огнезащитные свойства огнетушащего вещества. Поэтому актуальным является решение проблемы разработки эффективных средств огнезащиты лесной подстилки для создания опорных и заградительных полос.

Анализ последних исследований и публикаций. Постоянный поиск новых огнетушащих и огнезащитных составов для тушения лесных пожаров и способов их подачи показывает повышенный интерес к этой проблеме. В последнее время разным аспектам проблемы тушения лесных пожаров были посвящены исследования отечественных и зарубежных специалистов. Так, для борьбы с лесными пожарами предлагается применение химического замедлителя горения – хлорида магния (бишофита); привлечение авиации; повышение эффективности борьбы с лесными пожарами связывают с использованием водо-пенных средств пожаротушения, применением гелеобразующих и пенообразующих составов [2, 4]; использованием компрессионных и твердеющих пен [5].

При тушении низовых лесных пожаров с помощью ГОС, в случае обработки лесной подстилки с использованием раздельно-одновременной подачи компонентов была установлена возможность проникновения пламени под слоем геля [6]. Как альтернативный способ было предложено использовать пенообразующие системы с внешним пенообразованием (ПОС) [2]. Основным достоинством ПОС является то, что образуемая в ней пена обладает большими проникающими способностями в сравнение с ГОС. В ПОС предусматривается раздельная подача двух жидких компонентов с пенообразователем в распыленном виде. При попадании на лесную подстилку компоненты смешиваются и образуют пену. Данная система позволяет образовывать пену, как на поверхности, так и в слоях подстилки. Для образования пены в слоях подстилки необходима раздельно-последовательная подача компонентов, что обеспечивает проникновение компонентов вглубь подстилки.

Ранее были установлены высокие оперативные огнезащитные свойства гелеобразных составов. Также были проведены исследования огнезащитных характеристик ряда гелеобразующих систем. Были установлены качественные закономерности влияния концентраций веществ, входящих в состав ГОС, на их огнезащитные характеристики. В результате проведенных экспериментов установлено, что ГОС $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{CaCl}_2$ при раздельно-последовательном нанесении её компонентов оказалась наиболее эффективной, что представляет перспективу для проведения дальнейших исследований в этой области [4].

Постановка задачи и её решение. Целью работы является исследование влияния факторов (концентрация компонентов ГОС, масса и временем сушки покрытия) на время огнезащитного действия ГОС в

случае использования раздельно-последовательной подачи компонентов. Для этого были проведены ряд лабораторных экспериментов. В качестве лабораторного модельного очага низового лесного пожара была воспроизведена лесная подстилка из соснового опада размером (10x10) см, загрузкой 25 г, что соответствует удельной загрузке $2,5 \text{ кг/м}^2$, и толщине 5 см. Подстилка была сформирована на металлической решетке и подвешена на специальной установке (рис. 1).

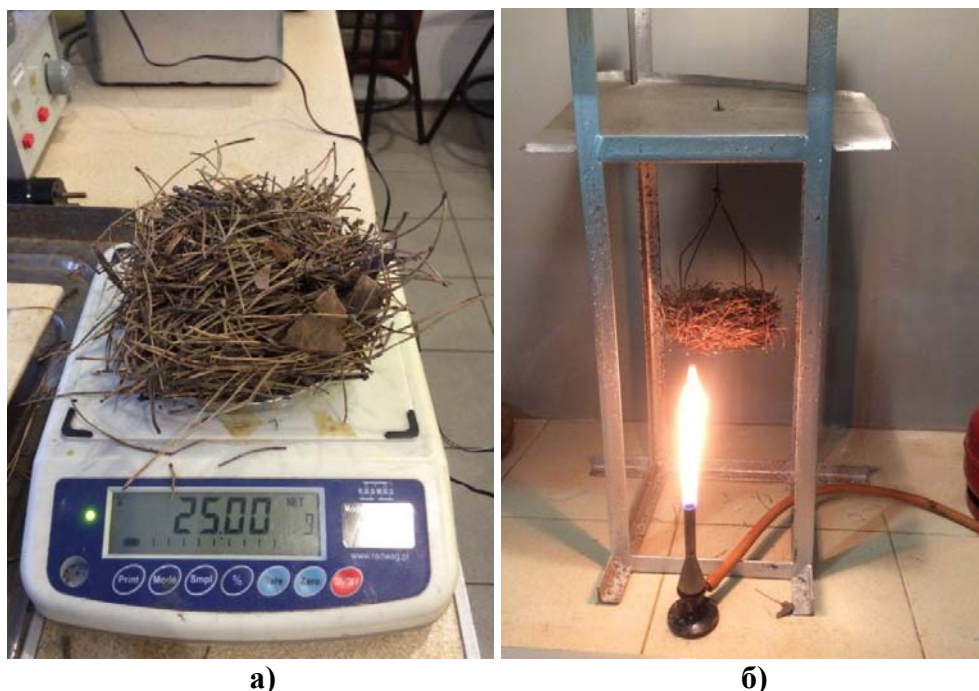


Рис. 1. Лабораторные исследования огнезащитного действия лесной подстилки обработанной ГОС под прямым воздействием пламени: а) взвешивание лесной подстилки; б) начало огневого испытания

Предварительно взвешенные модельные очаги обрабатывались из распылителей ОП–301 растворами сначала катализатором гелеобразования, а затем гелеобразователем, после чего снова определялась их масса. По разнице масс рассчитывалась масса геля образовавшегося в объеме лесной подстилки.

В качестве количественного показателя огнезащитного действия гелеобразующих составов было принято время воспламенения верхней части модельного очага низового лесного пожара в условиях действия открытого пламени. Огневое воздействие производилось с помощью газовой горелки. Высота пламени была на 5 см выше верхней части модельного очага. При этом горелка устанавливалась так чтобы центр пламени находился на расстоянии 2 см в середине модельного очага.

Обработка полученных результатов выполнена с использованием методов теории планирования эксперимента [7]. С учётом химической совместимости компонентов ГОС и условия возможности быстрого гелеобразования были определены уровни варьирования этих факторов (табл. 1) [8].

Эксперимент был реализован по плану, который дает возможность

предсказать значение функции отклика с дисперсией, одинаковой на равных расстояниях от центра плана, то есть был использован центральный композиционный рототабельный план второго порядка.

Табл. 1. Уровни варьирования четырёх факторов

Факторы	Кодовое обозначение	Нулевой уровень $x_i = 0$	Интервал варьирования	Максимальный уровень $x_i = + 1$	Минимальный уровень $x_i = - 1$	Звездные точки $x_i = + 2$	Звездные точки $x_i = - 2$
Концентрация $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$, %	x_1	15	5	20	10	25	5
Концентрация CaCl_2 , %	x_2	20	7,5	27,5	12,5	35	5
Масс нанесенного покрытия, г/см ²	x_3	0,7	0,15	0,85	0,55	1	0,4
Время сушки ЛГМ, мин	x_4	30	15	45	15	60	0

Реализация плана типа 2^4 представлена в табл. 2, которая дополнена семью опытами в центре плана и восьмью опытами в звездных точках с плечом равным двум интервалам варьирования.

Табл. 2. Условия и результаты опытов по исследованию огнестойкости лесной подстилки, обработанной гелеобразующей системой ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$)

x_1	x_2	x_3	x_4	$T_{\text{п}}$	x_1	x_2	x_3	x_4	$T_{\text{п}}$
-1	-1	-1	-1	4,11	-2	0	0	0	5,5
+1	-1	-1	-1	2,65	+2	0	0	0	4,53
-1	+1	-1	-1	12,1	0	-2	0	0	3,16
+1	+1	-1	-1	1,83	0	+2	0	0	5,5
-1	-1	+1	-1	10,5	0	0	-2	0	2,88
+1	-1	+1	-1	3,5	0	0	+2	0	12
-1	+1	+1	-1	12	0	0	0	-2	6,83
+1	+1	+1	-1	4,8	0	0	0	+2	4
-1	-1	-1	+1	5	0	0	0	0	3,66
+1	-1	-1	+1	5	0	0	0	0	4,16
-1	+1	-1	+1	6,83	0	0	0	0	4
+1	+1	-1	+1	3,6	0	0	0	0	4,81
-1	-1	+1	+1	8	0	0	0	0	4,33
+1	-1	+1	+1	3	0	0	0	0	3,16
-1	+1	+1	+1	9,8	0	0	0	0	3,33
+1	+1	+1	+1	4,4					

Выполнив расчет, значений коэффициентов регрессии и оценив их значимость по критерию Стьюдента [7], было получены уравнения регрессии времени воспламенения ($T_{\text{в}}$) и времени выгорания лабораторного участка ЛГМ

$$T_e = 3,922 - 1,729x_1 + 0,762x_2 + 1,38x_3 - 0,48x_4 - 0,79x_1 \cdot x_2 - 0,603x_1 \cdot x_3 + 0,769x_1 \cdot x_4 - 0,396x_2 \cdot x_4 + 0,36x_1^2 + 0,966x_3^2 + 0,46x_4^2. \quad (1)$$

Проверка адекватности полученной модели по критерию Фишера дала положительный результат.

Анализ выражения (1) показал, что при нулевых значениях всех факторов, показатель огнезащитной способности равен 3,92 мин. Уменьшение значения концентрации $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ в ГОС, дает наибольший эффект и ведет к увеличению огнезащитной способности покрытия. Увеличение массы нанесенного покрытия улучшает время огнезащитного действия. Так же установлена взаимосвязь между временем сушки обработанного участка и временем огнезащитного действия. В рамках изучаемого предела показатели времени сушки уменьшают время огнезащитного действия.

Проведем исследование выражения (1) на экстремум. Запишем частные производные по всем переменным

$$\frac{\partial T_e}{\partial x_1} = -1,729 + 0,72 \cdot x_1 - 0,79 \cdot x_2 - 0,603 \cdot x_3 + 0,769 \cdot x_4;$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial x_2} = 0,762 - 0,79 \cdot x_1 - 0,396 \cdot x_4;$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial x_3} = 1,38 - 0,603 \cdot x_1 + 1,932 \cdot x_3;$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial x_4} = -0,48 + 0,769 \cdot x_1 - 0,396 \cdot x_2 + 0,92 \cdot x_4.$$

Приравняв правые части полученных выражений нулю, получим систему линейных уравнений, которая после преобразования примет вид

$$\begin{cases} 0,72 \cdot x_1 - 0,79 \cdot x_2 - 0,603 \cdot x_3 + 0,769 \cdot x_4 = 1,729 \\ 0,79 \cdot x_1 + 0,396 \cdot x_4 = 0,762 \\ 0,603 \cdot x_1 - 1,932 \cdot x_3 = 1,38 \\ 0,769 \cdot x_1 - 0,396 \cdot x_2 + 0,92 \cdot x_4 = 0,48 \end{cases} \quad (2)$$

В результате решения системы (2) по формулам Крамера получена стационарная точка с координатами выходящими за область определения модели (1). Максимальное значение функции (1) было определено путем применения процедуры пошагового перебора по всем четырем координатам. Максимальное значение T_b соответствует координатам (-2,2,2,-2) и равняется 30,0 мин.

В результате исследования установлено, что максимальное значение времени воспламенения (максимальная огнезащитная эффективность) geleобразующей системы ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) достигается при минималь-

ных значениях концентрации $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7 \text{SiO}_2$ и времени сушки обработанного участка, а также при максимальных значениях концентрации CaCl_2 и массы нанесенного огнезащитного покрытия (рис.2). При этом нужно иметь в виду, что концентрацию $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7 \text{SiO}_2$ нельзя уменьшить ниже концентрации 5% во избежание потери способности к гелеобразованию.

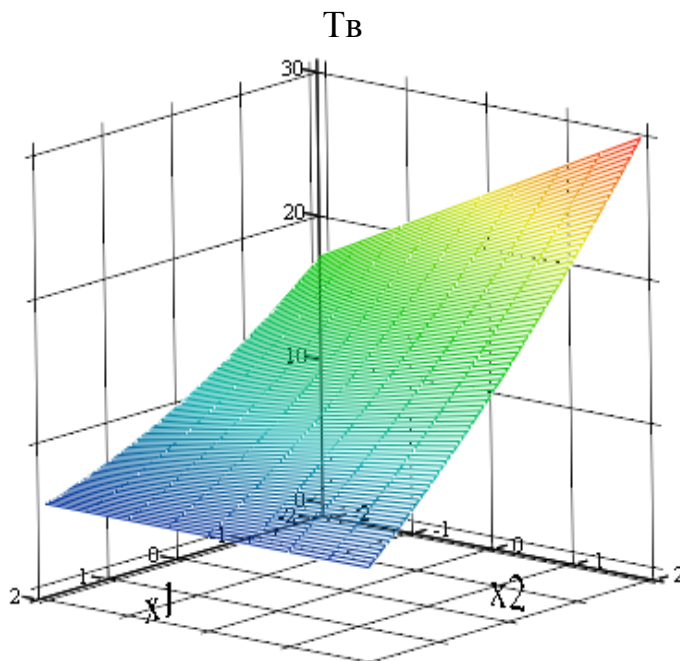


Рис. 2. Графическая интерпретация уравнения (1) при $x_3=2$, $x_4=-2$

Выводы. На основании экспериментальных исследований ($\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$) по отношению к хвойной лесной подстилке. Установлена взаимосвязь между её временем воспламенения и концентрациями компонентов, массой ГОС, временем сушки обработанного участка. Наибольшее значение времени воспламенения достигается при максимальной концентрации CaCl_2 , минимальной концентрации $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7 \text{SiO}_2$, максимальной массе геля и минимальном времени сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арцыбашев Е.С. Лесные пожары и борьба с ними / Е.С. Арцыбашев. –Л.: ЛенНИИЛХ, 1986. – 152 с.
2. Савельев Д.И. Экспериментальные исследования огнепреграждающих свойств лесной подстилки, обработанной пенообразующими системами / Д.И. Савельев, А.А. Киреев, К.В. Жерноклев // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУЦЗУ, 2016. – Вып. 40. – С. 169-173. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol40/saveliev.pdf>.
3. Кимстач И.Ф. Пожарная тактика: Учеб. пособие для пожарнотехн. училищ и нач. состава пожарной охраны / И.Ф. Кимстач, П.П. Девлишев, Н.М. Евтюшкин – М.: Стройиздат, 1984. – 590 с.

4. Савельев Д.И. Повышение эффективности использования гелеобразующих составов при борьбе с низовыми лесными пожарами / Д.И. Савельев, А.А. Киреев, К.В. Жерноклев // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУЦЗУ, 2016. – Вып. 39. – С. 237-242. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol39/Saveliev.pdf>.

5. Кректунов А.А. Использование компрессионной пены при тушении лесных пожаров / А.А. Кректунов, Е.Ю. Платонов, С.В. Торопов, А.Ф. Хабибуллин // Международный научный журнал «Аграрное образование и наука». – 2015. – №1(12). – С. 154. – Режим доступа к журн. : http://aon.urgau.ru/uploads/article/pdf_attachment/246/Кректунов.pdf.

6. Сумцов Ю.А. Выбор гелеобразующих составов для борьбы с лесными пожарами / Ю.А. Сумцов, А.А. Киреев, Г.В. Тарасенко // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УЦЗУ, 2006. – Вып. 19. – С. 143-148.

7. Винарский В.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / В.С. Винарский, М.В. Лурье. – Киев: Техника, 1975. – 168 с.

8. Абрамов Ю.О. Дослідження вогнегасної дії гелеутворюючих систем на основі силікатів / Ю.О. Абрамов, О.О. Кіреєв, О.М. Щербина, А.О. Бедзай // Пожежна безпека. – К. – 2007. – №11 – С. 100-104.

Получено редколлегией 13.03.2017

Д.І. Савельєв, С.М. Бондаренко, О.О. Кіреєв, К.В. Жернокльов

Дослідження вогнезахисної дії гелеутворюючих вогнегасних складів по відношенню до хвойної лісової підстилки

Проведено експериментальні дослідження вогнезахисного дії гелеутворюючої системи ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) по відношенню до хвойної лісової підстилки. Отримано регресійне рівняння що описує вплив концентрації компонентів системи, маси нанесеного покриття і часу сушки обробленого лісового горючого матеріалу на час її займання.

Ключові слова: гасіння лісових пожеж, низові лісові пожежі, лісова підстилка, гелеутворююча система, роздільно-послідовна подача, вогнезахист, хімічні опорні смуги.

D. Saveliev, S. Bondarenko, O. Kireiev, K. Zhernokliov

The Study of Fire-Retardant Effect of Gel-Forming Fire Extinguishing Compositions on Coniferous Forest Litter

The article focuses on the experimental study of the fire-retardant effect of the gel-forming system ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) on coniferous forest litter. As a result, a regressive equation is obtained which describes the influence of the concentration of the components of the system, the mass of the coating, and the time required for the forest litter to dry out on the time of its ignition.

Keywords: forest fire suppression, ground forest fires, forest litter, gel-forming system, separate-successive application, fire retardance, chemical firebreaks.