

*А. А. Киреев, д-р техн. наук, профессор, Д. И. Савельев,
Национальный университет гражданской защиты Украины*

ИЗУЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОГНЕЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ ПРИ ТУШЕНИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

В статье представлены результаты экспериментального исследования, посвященного изучению времени огнезащитного действия гелеобразующих систем при тушении лесных пожаров. Автором обоснован выбор состава гелеобразующей огнетушащей системы; экспериментально изучено огнезащитное действие гелеобразующей системы ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) по отношению к хвойной лесной подстилке. На основе полученных данных составлено регрессионное уравнение, описывающее влияние концентрации компонентов системы, массы нанесенного покрытия и времени сушки обработанного лесного горючего материала на время его воспламенения.

Ключевые слова: тушение лесных пожаров, лесная подстилка, химические опорные полосы, гелеобразующая система.

Постановка проблемы. Проблема тушения лесных пожаров ежегодно становится актуальной с приходом летнего сезона. Особо остро она стоит в засушливые периоды с минимальным количеством осадков, что создает условия для горения сухого лесного горючего материала. Каждый лесной участок имеет свой класс пожарной опасности, который определяется по степени возможности возникновения пожара. Наиболее опасным классом считается участки первого класса – насаждения хвойных пород в возрасте до 40 лет, лесные культуры, вырубки и др., которые и составляют основную часть лесных насаждений в Украине.

Тушение лесных пожаров, в том числе и на участках первого класса пожарной опасности, как правило, требует привлечение большого количества сил и средств. К основным способам тушения пожаров, которые применяются пожарными подразделениями в Украине, можно отнести: захлестывание 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]. Процесс тушения лесного пожара делится на две последовательно выполняемые тактические операции: локализацию очага пожара и ликвидацию горения. Также дополнительно проводят дотушивание очагов горения,

оставшихся внутри пожарища, и окарауливание участка, где был пожар.

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 стоящем здании [2]. Низовой пожар высокой интенсивности чаще всего останавливают пуском отжига навстречу фронта от опорной полосы, созданной с помощью засыпки грунтом, от естественных преград либо растворами химикатов. Отжиг производят от опорной полосы, проложенной на расстоянии не менее 80 м от фронта пожара. На флангах и в тылу лесного пожара создают заградительную минерализованную полосу без этапа отжига [3].

В случае создания опорных и заградительных полос время огнезащитного действия является основным показателем эффективности. При этом на время огнезащитного действия химических опорных полос непосредственно влияют огнезащитные свойства огнетушащего вещества, которое используется для их создания. Таким образом, актуальным является решение проблемы разработки эффективных средств огнезащиты лесной подстилки для создания химических 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 водопенных средств пожаротушения, применением гелеобразующих и пенообразующих составов (ГОС, ПОС); использованием компрессионных и твердеющих пен [2; 4; 5].

В ходе нашей работы мы изучили особенности применения ГОС и ПОС для тушения низового лесного пожара. При сравнении проникающих способностей данных бинарных систем было установлено, что пена, образуемая при использовании ПОС с внешним пенообразователем, обладает большей проникающей способностью в сравнении с гелем. Однако дальнейшие эксперименты показали, что со временем образовавшаяся пена быстро разрушается, а обработанная поверхность после сушки теряет свои огнезащитные свойства. Таким образом, несмотря на более низкую проникающую способность, для решения проблемы выбора эффективного средства для создания химических огнезащитных полос в ходе тушения лесных пожаров, было решено использовать ГОС с учетом дальнейшей работы над улучшением проникающей способности гелеобразующей системы.

Изучив огнезащитные характеристики ряда гелеобразующих систем, мы установили качественные закономерности влияния концентраций веществ, входящих в состав ГОС, на их огнезащитные характеристики. В результате проведенных экспериментов был сделан вывод о том, что ГОС $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{CaCl}_2$ при раздельно-последовательном нанесении её компонентов на лесную подстилку является наиболее эффективной [4].

Формулировка целей статьи. 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, а также определение рабочей модели использования гелеобразующей системы для тушения пожаров в экосистемах.

Изложение основного материала исследования. Для достижения поставленной цели был проведен 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).

Предварительно взвешенные модельные очаги обрабатывались из распылителей ОП-301 сначала катализатором гелеобразования, а затем гелеобразователем, после чего снова определялась их масса. По разнице масс рассчитывалась масса геля, образовавшегося в объёме 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 верней части модельного очага. При этом горелка устанавливалась так, чтобы центр пламени находился на расстоянии 2 см к 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.

«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»



а)



б)

Рисунок 1 – Лабораторные исследования огнезащитного действия лесной подстилки, обработанной ГОС под прямым воздействием пламени: а – взвешивание лесной подстилки; б – начало огневого испытания

Таблица 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
Масса 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.

Выполнив расчет значений коэффициентов регрессии и оценив их значимость по критерию Стьюдента [7], мы получили уравнения регрессии времени воспламенения (T_b) и времени выгорания лабораторного участка ЛГМ:

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

«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»

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. Также 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 к нулю, получим систему линейных уравнений, которая после преобразования примет такой 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_v соответствует координатам (-2,2,2,-2) и равняется 30,0 мин.

В результате исследования установлено, что максимальное значение времени воспламенения (максимальная

огнезащитная эффективность) гелеобразующей системы ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$) достигается при минимальных 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.

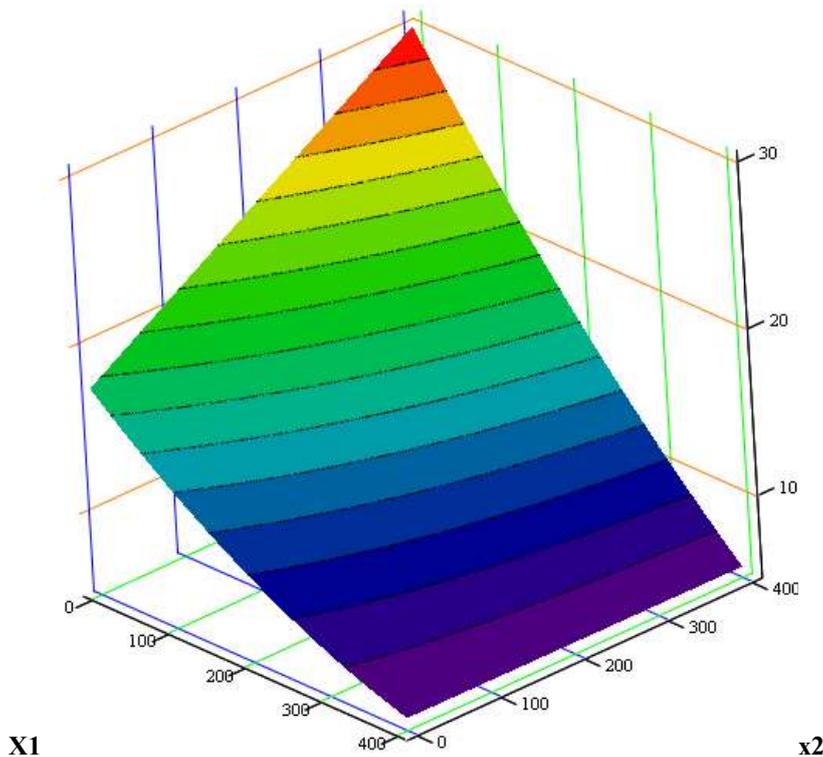


Рисунок 2 – Графическая интерпретация уравнения (1) при $x_3 = 2$, $x_4 = -2$

Выводы. На основании экспериментальных исследований огнезащитного действия гелеобразующей системы ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7 \text{SiO}_2$) по отношению к хвойной лесной подстилке была установлена взаимосвязь между её временем воспламенения и концентрацией 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.

Таким образом, применение гелеобразующих систем для тушения и ограничения распространения низовых лесных

пожаров возможно при последовательной подаче растворов гелеобразователя и катализатора гелеобразования, при этом повышение эффективности тушения и огнезащиты достигается за счет удержания водосодержащего слоя внутри лесной подстилки в виде негорючего и нетекучего геля.

Перспективы дальнейших исследований. Перспективным этапом работы остается проведение эксперимента, направленного на изучение влияния скорости ветра и особенностей рельефа местности на использование гелеобразующей системы для тушения лесных пожаров.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСТОЧНИКОВ

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/saveliiev.pdf>.

3. Кимстач И.Ф. Пожарная тактика: Учеб. пособие для пожарно-техн. 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 / Савельев Д.И., Киреев А.А., Жерноклев К.В. // 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 [Электронный ресурс] / Кректунов А.А., Платонов Е.Ю., Торопов С.В., Хабибуллин А.Ф. // 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 / Сумцов Ю.А., Киреев А.А., Тарасенко Г.В. // 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 / Абрамов Ю.О., Киреев О.О., Щербина О.М., Бедзай А.О. // Пожежна безпека. – К. – 2007. – №11 – С. 100-104.

REFERENCES

1. Arcybashev E.S. Lesnye pozhary i bor'ba s nimi / E.S. Arcybashev. –L.: LenNIILH, 1986. – 152s.

2. Savel'ev D.I. EHksperimental'nye issledovaniya ognepregrazhdayushchih svojstv lesnoj podstilki, obrabotanoj penoobrazuyushchimi sistemami / D.I. Savel'ev, A.A. Kireev, K.V. ZHernoklev // Problemy pozharnoj bezopasnosti. – H.: NUCZU, 2016. – Vyp. 40. – S. 169 – 173. Rezhim dostupa: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol40/saveliev.pdf>.

3. Kimstach I.F. Pozharnaya taktika: Ucheb. posobie dlya pozharno-tekhn. Uchilishch i nach. sostava pozharnoj ohrany / I.F. Kimstach, P.P. Devlishev, N.M. Evtyushkin – M.: Strojizdat, 1984. – 590 s.

4. Savel'ev D.I. Povyshenie ehffektivnosti ispol'zovaniya geleobrazuyushchih sostavov pri bor'be s nizovymi lesnymi pozharami / Savel'ev D.I., Kireev A.A., ZHernoklev K.V. // Problemy pozharnoj bezopasnosti. – H.: NUCZU, 2016. – Vyp. 39. – S. 237 – 242. Rezhim dostupa.: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol39/Saveliev.pdf>.

5. Krektunov A.A. Ispol'zovanie kompressionnoj peny pri tushenii lesnyh pozharov [Elektronnij resurs] / Krektunov A.A., Platonov E.YU., Toropov S.V., Habibullin A.F. // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Agrarnoe obrazovanie i nauka». – 2015. – №1(12). – S. 154. – Rezhim dostupa k zhurn. : http://aon.urgau.ru/uploads/article/pdf_attachment/246/Krektunov.pdf.

6. Sumcov YU.A. Vybort geleobrazuyushchih sostavov dlya bor'by s lesnymi pozharami / Sumcov YU.A., Kireev A.A., Tarasenko G.V. // Problemy pozharnoj bezopasnosti. – H.: UCZU, 2006. – Vyp. 19. – S. 143 – 148.

7. Vinarskij V.S. Planirovanie ehksperimenta v tekhnologicheskikh issledovaniyah / V.S. Vinarskij, M.V. Lur'e. – Kiev: Tekhnika, 1975.– 168 s.

8. Abramov YU.O. Doslidzhennya vognegasnoї дії geleutvoryuyuchih sistem na osnovi silikativ / Abramov YU.O., Kireev O.O., SHCHerbina O.M., Bedzaj A.O. // Pozhezhna bezpeka. – K. – 2007. – №11 – S. 100-104.

*О. О. Кіреєв, д-р техн. наук, професор, Д. І. Савельєв,
Національний університет цивільного захисту України*

ВИВЧЕННЯ ЧАСУ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ДІЇ ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИХ СИСТЕМ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Статтю присвячено висвітленню результатів експериментального дослідження, присвяченого вивченню часу вогнезахисної дії гелеутворюючих систем у разі їх викривання для гасіння лісових пожеж. Автором обґрунтовано вибір складу гелеутворюючої вогнегасної системи; експериментально вивчено вогнезахисну дію гелеутворюючої системи ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) у разі її використання на

хвойній лісовій підстилці. На основі отриманих даних укладено регресійне рівняння, яке демонструє вплив концентрації компонентів системи, маси покриття, що було нанесене, і часу сушки обробленого лісового горючого матеріалу на час її займання.

Ключові слова: *гасіння лісових пожеж, лісова підстилка, хімічна опорна смуга, гелеутворююча система.*

*Kireev O. O., doctor of technical sciences, professor, Saveliev D. I.,
National University of Civil Protection of Ukraine*

THE STUDY OF THE FIRE-RETARDANT ACTION TIME OF GEL-FORMING SYSTEMS USED FOR EXTINGUISHING FOREST FIRES

The article focuses on the peculiarities of using gel-forming fire-extinguishing systems for dealing with forest fires. It aims to explain the choice of the composition of the gel-forming system which will demonstrate the best fire-extinguishing and fire-retardant properties when being used on coniferous forest litter. The article also describes the fire-retardant action and properties of the gel-forming system ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) in case of its application to coniferous forest litter. The fire-extinguishing action and fire-retardant properties of the gel-forming system have been established by means of the standard methodologies for determining the fire-extinguishing and fire-retardant properties. Taking into consideration the experimental data, the author distinguishes the factors which have an impact on the fire-retardant properties of the gel-forming system under investigation, namely, the concentration of the system components, the mass of the

coating applied, and the dry-out time. The experiments have been conducted on a laboratory model of the seat of fire consisting of the dry pine litter (size – 10X10 cm, weight – 25 g, height – 5 cm) placed on a metallic grille and hung on a special facility. The relation between the above-mentioned factors and the time of ignition of the forest litter covered with the gel-forming system ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) is displayed by means of a regressive equation. The use of the gel-forming systems, including the $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ system, for extinguishing and restricting the spread of ground forest fires will be most effective if the solutions of the gel-forming substance and gel-forming catalyst are applied separately and subsequently.

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