

## ИСПЫТАНИЯ ОГNETУШАЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГИДРОГЕЛЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ ТУШЕНИИ МОДЕЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ

аспирант **О.А. Ивченко**

кандидат химических наук, доцент **К.Е. Панкин**

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»,

г. Саратов, Российская Федерация

Тушение природных пожаров во многом зависит от эффективного применения пожарными огнетушащих средств. Тем не менее, существуют объективные пределы огнетушащей способности известных веществ и материалов, преодолеть которые нельзя ни тактическими, ни технологическими приемами. В работе предложен способ тушения низовых пожаров с применением в качестве огнетушащих составов гидрогелей алюминия с различной концентрацией, позволяющий реализовать одновременно три способа тушения: охлаждение, изоляцию и ингибирование горения. Исследования огнетушащей способности выбранных огнетушащих составов проводили по специально разработанной методике, имитирующей образование и развитие низового природного пожара на опытных участках. Эффективность тушения оценивалась путем сравнения результатов суммарных расходов огнетушащих средств к единице длины кромки пожара и единице площади пожара. Показано, что наилучшей огнетушащей способностью обладает водный раствор гидрогеля алюминия с концентрацией 3.5-7 г/л. Исследована огнетушащая способность гидрогелей алюминия, и полученные результаты были сравнены с огнетушащей способностью воды и водными растворами карбоната натрия (сода) и сульфата натрия. Серьезного вклада в огнетушение применение других водных растворов (сода и сульфата натрия) не выявлено, поэтому огнетушащий эффект полностью обусловлен химическим составом и физико-химическими свойствами гидрогеля алюминия. На основании полученных данных определены расходы гидрогеля алюминия на единицу длины и площади пожара, наименьшая его концентрация, сохраняющая огнетушащий эффект, и технологические условия его получения и применения.

**Ключевые слова:** лесные пожары, низовые пожары, тушение пожаров, гидрогель алюминия

## TESTS OF FIRE EXTINGUISHING ABILITY OF ALUMINUM HYDROGEL WHEN EXTINGUISHING MODEL NATURAL GROUND FIRES

post-graduate student **O.A. Ivchenko**

PhD (Chemistry), Associate Professor **K.E. Pankin**

FSBEI HE "Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov", Saratov, Russian Federation

### Abstract

Extinguishing natural fires largely depends on the effective use of fire extinguishers by firefighters. Nevertheless, there are objective limits to the fire extinguishing ability of known substances and materials, which cannot be overcome by either tactical or technological methods. In the work, a method for extinguishing ground fires using aluminum hydrogels with different concentrations as fire extinguishing compositions is proposed, which makes it possible to simultaneously realize three extinguishing methods: cooling, insulation, and combustion inhibition. Investigation of fire extinguishing ability of the selected fire extinguishing compositions has been carried out according to a specially developed technique that simulates formation and development of ground natural fire in experimental plots. Extinguishing efficiency was assessed by comparing the results of the total cost of extinguishing agents to a unit of length of the edge

of the fire and a unit of area of the fire. It was shown that the best fire extinguishing ability has an aqueous solution of aluminum hydrogel with a concentration of 3.5-7 g/l. Fire extinguishing ability of aluminum hydrogels was investigated. The obtained results were compared with the fire extinguishing ability of water and aqueous solutions of sodium carbonate (soda) and sodium sulfate. The use of other aqueous solutions (soda and sodium sulfate) has not shown significant contribution to fire extinguishing. Therefore, fire extinguishing effect is completely due to the chemical composition and physical and chemical properties of aluminum hydrogel. Based on the data obtained, aluminum hydrogel costs per unit length and area of the fire, its lowest concentration, which retains the fire extinguishing effect and the technological conditions for its preparation and use, have been determined.

**Keywords:** forest fires, ground fires, fire extinguishing, aluminum hydrogel

### Введение

Тушение лесных пожаров имеет важную народно-хозяйственную задачу, цель которой заключается в сохранении видового разнообразия лесных ценозов, экологической функции лесных массивов, древесных ресурсов и недревесных продуктов леса, а также сложившихся экосистем для лесовоспроизводства. Лесной массив представляет собой громадный запас разнообразных горючих материалов, накапливающихся в нем по мере его роста и развития. Изменение климата – его постепенное потепление, а также интенсивное ведение хозяйственной деятельности в лесных массивах приводит к возникновению и распространению лесных пожаров. Профилактические меры борьбы с лесными пожарами часто являются неэффективными из-за большой протяженности лесных массивов, малых объемов проводимых мероприятий, что, в конечном итоге, приводит к неспособности комплекса проведенных мероприятий снизить пожарную опасность, уменьшить вероятность возникновения пожара, эффективно препятствовать его распространению, создавать возможность его своевременного обнаружения.

Тушение лесного пожара – это проведение комплекса мероприятий по прекращению горения лесных горючих материалов (ЛГМ). Для этого формируются специальные подразделения по тушению лесных пожаров, накапливаются и расходуются материальные средства для тушения – чаще всего вода, которую доставляют и подают в зону горения или проводят обводнение территории при тушении пожаров на торфяниках [1, 2]. Применение других огнетушащих составов (огнетушащие порошки, грунт и т.п.) при тушении природных пожаров либо крайне ограничено (только с целью

исследования [3]), либо затруднительно по техническим и технологическим причинам [4].

Каждый огнетушащий состав (ОС) обладает своими объективными пределами по огнетушащей способности, которые необходимо учитывать для определения достаточности его подачи в зону горения. Эффективность применения ОС зависит от того, какое минимальное количество огнетушащего вещества объективно необходимо для прекращения горения, в случае низового лесного пожара это количество (масса в кг) должно быть отнесено к площади или к длине кромки. Ввиду отсутствия опубликованных в научнотехнической литературе систематических работ в данном направлении оценка эффективности тушения природных пожаров представляет собой серьезную научно-техническую задачу, решение которой не найдено до сих пор. Методологические трудности настолько очевидны, насколько трудны в определении. Лесной пожар фактически не обладает площадью из-за постоянного перемещения кромки пожара в пространстве, а ширина кромки по мере развития пожара ничтожно мала по сравнению с площадью, пройденной пожаром. Поэтому с объективной точки зрения пожар не может измеряться площадью, этот параметр может быть отнесен только к описанию последствий пожара – площадь горельника, площадь, пострадавшая от пожара и т.п. Второй параметр – длина кромки пожара – также является довольно условной величиной, т.к. непосредственное горение происходит на некоторой площади, определяя кроме длины кромки еще и ее ширину. Ширина кромки низового пожара определяется несколькими условиями (массой ЛГМ на единице площади лесной почвы, равномерностью распределения

ЛГМ по поверхности почвы, влажностью ЛГМ, типом ЛГМ, скоростью ветра в приземном слое атмосферы и т.п.), а фактически является суперпозицией двух параметров: скорости выгорания ЛГМ и скорости перемещения фронта пламени по слою ЛГМ на поверхности почвы. Из этого следует, что ширина кромки (определяющая непосредственную площадь горения) будет строго индивидуальна для данной местности и данных погодных условий. Осознавая эти трудности, авторы работы [5] ограничились не теоретической оценкой массовой характеристики расхода ОС, а интенсивностью – параметром, определяющим массовую (объемную) скорость подачи огнетушащего состава в зону горения (на единицу его площади).

Еще одной проблемой, с которой сталкивается исследователь при оценке эффективности пожаротушения, является контроль прекращения горения, который является индикатором достаточности противопожарных мероприятий. Тушение пожара обязано проводиться до полного прекращения взаимодействия горючего вещества и окислителя. До сих пор остается неясным, как определить момент прекращения горения? В случае природного пожара доступно только визуальное определение. Наиболее заметно прекращение горения по исчезновению пламени, однако при этом горение может перейти в беспламенный режим, определить который можно по выделению дыма – смеси продуктов и полупродуктов горения. Поэтому при тушении низовых пожаров обязательны процедуры окарауливания и дотушивания участков, на которых высока вероятность повторного возникновения пламенного горения как наиболее интенсивной формы природного пожара. Таким образом, окончание горения можно определить по прекращению выделения дыма. Тем не менее, такой способ пригоден для лабораторных исследований, но обладает значительными трудностями при реальном тушении низовых пожаров. Именно поэтому при планировании мероприятий по тушению пожара в расчет необходимого количества огнетушащего состава вводится специальный параметр – коэффициент запаса ОС. Но введение данного коэффициента значительно

снижает точность определения расхода ОС (т. к. его значение чаще всего составляет 3 и более), и его учет переводит исследования в данной области из количественного в качественные. Скорость подачи ОС в зону горения также будет вносить свои коррективы в учет расхода ОС на тушение, т. к. контроль прекращения горения осуществляется визуально оператором, то и прекращение подачи огнетушащего вещества осуществляется именно им. Таким образом, прекращение пожаротушения всегда будет по времени дольше самого горения и, тем самым, количество ОС, поданное в зону горения, будет всегда больше необходимого. Следует учесть также, что чем больше скорость подачи ОС в зону горения, тем выше будет ошибка в определении эффективности, обусловленная его перерасходом, что никак не будет способствовать выявлению факторов, обеспечивающих снижение расхода ОС.

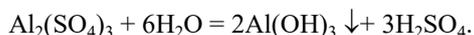
Следует отметить, что прекращение горения можно реализовать разными способами: *охлаждением, изоляцией, ингибированием и разбавлением* [6, 7]. Однако последние два способа пока не применяются в большом масштабе при тушении природных пожаров, и в научно-технической литературе пока отсутствуют крупные систематические исследования в данном направлении. При тушении природных пожаров чаще всего применяют первые два, для реализации которых применяют способ заливания кромки пожара водой и водными растворами поверхностно-активных веществ – смачивателей, а также засыпку грунтом вручную [1, 2] или с помощью грунтомета [4]. Все же есть определенная возможность реализации иных способов прекращения горения. К примеру, ингибирование возможно реализовать, добавляя в воду некоторые неорганические добавки: соли аммония, серной, фосфорной кислот, кремний-, магний-, бор-, железо-, цинк-, медь-, титан-содержащие вещества и т. п. [8-15]. Алюминийсодержащие препараты относятся к лидерам по применению в промышленных масштабах для производства антипиренов – веществ, подавляющих горение [15]. Применяя алюминийсодержащий препарат [16], удалось добиться снижения расхода ОС в 3-3,5 раза по сравнению с примене-

нием для тех же целей водопроводной воды. Таким образом, появляется возможность совместить в одной технологической операции тушения сразу три способа тушения: *охлаждение, изоляцию и ингибирование*, что должно, при прочих равных условиях, привести к снижению количественных характеристик расхода ОС.

Учитывая вышеописанное, для исследования огнетушащей способности веществ и материалов пригоден только метод сравнения количественных характеристик расхода исследуемых ОС с аналогичными параметрами для уже известных и применяемых на практике ОС. Поэтому целью данной работы явилось исследование огнетушащей способности гидрогелей алюминия (ГА) в полевых условиях и сравнение полученных значений их расхода с расходами на тушение водопроводной воды в аналогичных условиях.

### Материалы и методы

ГА был получен путем растворения навески твердого вещества – сульфата алюминия в водопроводной воде. Данный способ отличается простотой применения и требует только двух компонентов: определенной массы сульфата алюминия и требуемого объема воды. При смешении этих компонентов образование ГА проходит согласно следующей схеме:



Сульфат алюминия – соль, образованная слабым основанием и сильной кислотой, поэтому ее гидролиз осуществляется по слабому основанию с образованием твердого гидроксида алюминия. Образование кристаллического гидроксида алюминия проходит через стадию образования коллоидного раствора – ГА. Коллоидный раствор неустойчив во времени и постепенно разрушается, формируя кристаллический гидроксид алюминия. Данный процесс можно контролировать визуально. Образование коллоида сопровождается потерей прозрачности раствора (его помутнением), что можно легко обнаружить, поместив раствор в прозрачный сосуд (стеклянную банку или пластиковую бутылку или контейнер). Восстановление прозрачности раствора с течением времени свидетельствует о разрушении коллоидного раствора и образовании твердого кристаллического

гидроксида алюминия, который начинает накапливаться на дне сосуда.

Навеску выбирали таким образом, чтобы получить минимальную концентрацию ГА при приемлемой огнетушащей эффективности в определенном ряду от 1.7, 3.5, 7, 14 и 28 г/л. Основанием выбора концентрации гидрогеля алюминия являлись результаты работы [16]. Для выявления эффективности тушения ГА результаты тушения сравнивали с тушением водопроводной водой в тех же условиях. В качестве объектов сравнения и для выявления природы огнетушащей способности были использованы дополнительно водные растворы карбоната натрия – соды (насыщенный раствор) и сульфата натрия (28 г/л).

Полевые исследования проводились в конце августа – начале сентября 2019 года на территории Саратовской области в условиях создания искусственного очага низового пожара. Местность была выбрана по результатам анализа погодных данных с отсутствием осадков в течение 45 дней. Влажность воздуха по истечении данного срока составила 22-24 %, температура воздуха в дневное время составила 24-30 °С, атмосферное давление близко к нормальному, скорость ветра в зависимости от времени суток варьировалась от полного штиля до 4-6 м/с. На открытых участках местности при порывах ветра наблюдалось пылеобразование, что косвенно свидетельствует о крайнем состоянии высушенности верхнего слоя почвы. Измерение температуры воздуха, его влажности и скорости ветра осуществлялось с помощью прибора Метеоскоп-М (ООО «НТМ-Защита», Россия). В качестве экспериментальных были выбраны участки почвы, заселенные разнотравьем. Для обеспечения устойчивого горения и формирования условий, близких к условиям устойчивого низового пожара, участки выбирались с равномерным травостоем с высотой 30-50 см. Участки местности размечали вешками, устанавливаемыми через равные расстояния 1 или 2 метра друг от друга для оценки скорости распространения пламени по участкам, определения ширины кромки пожара, высоты пламени, а также оценки равномерности распространения пламени (рис. 1). Размеры участков выбирались

таким образом, чтобы запаса ОС в ранцевом огнетушителе было заведомо больше, чем необходимо для его тушения. В целях соблюдения правил пожарной безопасности все участки были опаханы, т. е. по периметру всех участков создавалась минерализованная полоса шириной не менее 1,5 м, кроме этого при исследовании горения и тушения на месте проведения экспериментов всегда присутствовал дополнительный оператор тушения с ранцевым огнетушителем, заполненным водой, на случай экстренного тушения при потере контроля за процессом горения. Процесс исследования показал, что примененных мер пожарной безопасности было достаточно и оператор осуществлял только дополнительную проливку кромки пожара по завершении серии экспериментов в конце дня.

Поджог участков осуществлялся по направлению ветра с помощью аппарата зажигательного «Ермак» (Россия). На развитие горения отводили 10-20 с – время, достаточное, в данных условиях, для формирования устойчивого горения травяного покрова и образования кромки пожара. Тушение кромки пожара осуществлялось с применением ранцевого огнетушителя РП-15 (Ермак, Россия), который заполнялся исследуемым ОС. Выбор



Рис. 1. Участок исследования  
(собственные фото авторов)

Проведение эксперимента в равных погодных и природных условиях, а также сравнение величин расхода различных ОС, отнесенных к площади и длине кромки, нивелирует все остальные различия. Тушение осуществлялось не менее трех раз (для каждого типа огнетушащего состава)

ранцевого огнетушителя был обусловлен малой скоростью подачи ОС, обеспечиваемой ручным поршневым насосом. Перекачка жидкого ОС в этом случае контролируется оператором, и появляется некоторая возможность более точного определения расхода ОС на тушение. Применить для аналогичных целей садовый опрыскиватель типа «Жук» ОП-209 не представилось возможным в связи с его малым расходом жидкости 0,6-0,8 л/мин [17], малой дальностью струи. Кроме этого, распылитель выполнен из пластмассовых деталей, которые могут быть повреждены теплотой, выделяемой при горении, и т. п. Для контроля расхода ОС и определения эффективности действия ОС ранцевый огнетушитель взвешивался на электронных весах – безмене до и после проведения эксперимента, и по разнице в массе определялся расход ОС на тушение. Для определения эффективности тушения различными ОС относили массу ОС к площади (и длине кромки) пожара. Для определения площади пожара проводили измерение длины и ширины сгоревшего участка, а затем для учета отклонения его формы от прямоугольной применяли модель эллипса, по полуосям которого рассчитывали его площадь и длину.



Рис. 2. Гидрогель алюминия  
(собственные фото авторов)

для исключения грубых промахов и расчета коридора ошибок. Скорость распространения пламени по исследуемому участку определяли по изучению видеозаписи процесса образования и распространения изучаемого низового пожара, путем засечки времени преодоления им

размеченного вешками участка. Высоту пламени определяли по высоте обгоревшего поверхностного слоя установленных на участках вешек.

### Результаты и обсуждение

Для точного определения пригодности гидрогеля алюминия в качестве ОС для применения его при тушении реального природного пожара необходимо выявить устойчивость во времени его водного раствора. Непосредственное визуальное наблюдение состояния ГА в ранцевом огнетушителе невозможно, поэтому проще экспериментально определить время потери мутности раствора и учитывать его в дальнейшем при работе с ГА. Сульфат алюминия обладает высокой растворимостью в воде – 342 г/л [18]. При помещении твердого сульфата алюминия в водопроводную воду в исследуемом диапазоне концентраций он растворяется при перемешивании очень быстро, в течение 10-30 секунд. По истечении данного времени наблюдается помутнение раствора (потеря прозрачности) – образование коллоидного раствора – ГА (рис. 2). Устойчивость коллоидного раствора с концентрациями сульфата алюминия в диапазоне 3,5-28 г/л составляла 40-50 минут при температуре 20-25 °С, к этому времени гидрогель полностью разрушался, твердый осадок гидроксида алюминия выпадал на дно сосуда, и эффективность его применения должна снижаться. Это время в дальнейшем учитывалось при проведении полевых испытаний, т. е. ГА подготавливался непосредственно перед осуществлением тушения, что в принципе является сходным при подготовке к процедуре тушения реального низового лесного пожара.

Из всех метеорологических условий на распространение пламени низового пожара больше всего влияет скорость ветра в приземном слое атмосферы. Исследования метеоусловий показали, что в дневное время в данной области наблюдается наличие ветра с различной скоростью. Минимальная скорость ветра наблюдалась в утренние и вечерние часы, в то время как к полудню ветровая обстановка становилась неустойчивой от полного штиля до кратковременных порывов 10-15 м/с. В среднем скорость ветра в дневные часы достигает 3-6 м/с. Такая скорость ветра в сочетании с низкой

влажностью воздуха способствует формированию благоприятных условий для возникновения и распространения низового пожара.

Для оценки эффективности тушения было проведено исследование горючих материалов, расположенных на площади предполагаемого модельного пожара. Для этого на участке на площади 0,8×0,9 м полностью удалялась растительность и растительные остатки, сохранившиеся с предыдущего сезона до обнажения минерального слоя почвы (рис. 3). Проведено исследование видового состава растительности: 80 % – пырей ползучий, 20 % – шалфей, полынь, василек, люцерна и т. п. Для определения массы горючих веществ, расположенных на единице площади исследуемого участка, удаленные растения и растительные остатки взвешивались на весах, и полученная масса пересчитывалась на 1 м<sup>2</sup> площади исследуемого участка. Данные, полученные с нескольких участков, не различались более чем на 50 %, поэтому значения усреднялись. Полученное распределение массы горючих материалов на площади составило в среднем 0,7-1,1 кг/м<sup>2</sup>.

На первом этапе было проведено исследование горения участка местности для определения ширины кромки пожара и высоты образуемого ЛГМ пламени (рис. 4). Данная информация необходима для более точной оценки процесса горения, происходящего на данном участке, а также для оценки быстроты проведения эксперимента по тушению, для обеспечения максимально возможной точности в количественной оценке расхода ОС. Дело в том, что скорость распространения пламени при сложившихся погодных условиях может быть больше скорости тушения, из-за этого в процессе эксперимента кромка пламени достигнет границы участка быстрее, чем будет осуществлено ее тушение. В таком случае эксперимент необходимо будет признать неудачным и результаты его нельзя будет учесть для общей оценки эффективности применения ОС. Предварительные исследования показали, что в сложившихся погодных условиях ширина экспериментальных участков должна составлять не менее 5-10 метров.

Как было отмечено выше, ширина кромки пожара определяется отношением скорости горе-

ния материалов, накопленных на поверхности почвы, и скорости распространения пламени по слою горючего материала. Вторым параметром больше зависит от погодных условий, а именно от скорости ветра в данной местности и в данное время. Горение процесс скоротечный, поэтому ширину кромки пожара определяли по анализу видеозаписи процесса распространения пламени и определения времени достижения пламенем разметочных линий на участке. Исследования показали, что скорость распространения пламени составляет 3-3,5 м/мин для щиты, 5-6 м/мин для скорости ветра 3-6 м/с, порывы ветра свыше 10 м/с приводили к повышению скорости движения кромки, срыву пламени с горючего материала и тушению пожара. Таким образом, участок шириной 5 метров выгорает за 60-90 с при щиты, за 20-40 с при 3-6 м/с. При порывах ветра (более 10 м/с) в отдельных участках травостоя наблюдалось движение кромки пожара со скоростью 10-12 м/мин, а на отдельных участках происходил срыв пламени и ветровое тушение кромки низового пожара.



Рис. 3. Оценка запаса природных горючих материалов на выбранных экспериментальных участках (собственные фото авторов)

Тушение кромки пожара осуществлялось в два этапа: (1) подачей огнетушащего вещества в зону(ы) горения ручным способом до исчезновения пламенного горения. По мере тушения кромки пожара осуществлялся переход к следующему участку горения (вдоль кромки пожара) до полного подавления процесса пламенного горения; (2) проводилось наблюдение за выделением дыма на экспе-

Несмотря на выбор участков для исследования горения и огнетушения с равномерным травостоем, скорость горения в разных частях участка была различной, что обуславливало непрямолинейную форму кромки пожара, форма которой была далека от трапецевидной. В отдельных частях исследуемого участка скорость движения кромки пламени в 1,5-2 раза превышала среднюю скорость перемещения кромки. Свой вклад в непрямолинейность кромки пожара осуществляет и процесс поджиг с помощью аппарата зажигательного («Ермак», Россия), применение которого не в состоянии обеспечить равномерный поджиг сразу всей стороны исследуемого участка. Высота пламени, формируемая при горении ЛГМ, согласно измерению высоты обгоревшего слоя на вешках составила 0,35-0,5 м. Тем не менее, данный параметр довольно условный, т. к. высота пламени в значительной степени зависит от скорости ветра, что на открытой местности является решающим фактором.



Рис. 4. Участок после исследования тушения низового пожара (собственные фото авторов)

риментальном участке и осуществления (в случае необходимости) операции дотушивания при повторном самопроизвольном возникновении горения. Тушение осуществляли водой, водными растворами гидрогеля алюминия различных концентраций и водными растворами других неорганических соединений (табл. 1).

Для повышения объективности оценки расхода ОС на разных участках изменяли последовательность действий следующим образом: сперва тушение осуществляли водой, а затем гидрогелем определенной концентрации, затем наоборот. К тому же оператор, осуществлявший тушение, не знал, какое ОС в залито в ранцевый огнетушитель. В задачу оператора входило прекращение горения с минимально возможным расходом ОС.

Была проведена серия экспериментов, достаточная для статистической обработки. Усредненные данные представлены в табл. 1, N – число параллельных экспериментов.

Полученные данные показывают, что на тушение 1 м кромки пожара в среднем потребовалось 0,21 кг воды (при средней ширине кромки пожара 30-40 см), а ГА потребовалось только 0,09-0,1 кг, что 2,3 раза меньше, чем воды. При оценке эффективности тушения пожара на его общую площадь площади пожара ушло в среднем 0,52 кг/м<sup>2</sup> воды, а ГА только 0,23 кг, что также в среднем в 2,3 раза меньше, чем воды. Наименьший средний расход ГА для тушения кромки пожара составил 0,09-0,11 кг/м при концентрации 3,5-14 г/л. При этом увеличение концентрации ГА в воде с 7 до 28 г/л, т. е. в 4 раза, не дает сколь-нибудь значительной прибавки в эффективности тушения и ведет фактически только к перерасходу гидрогеля. Такой результат можно объяснить тем, что при интенсивном горении ЛГМ, в условиях малой влажности и малой поверхностной плотности горючих материалов на почве, большая часть выливаемого жидкого раствора просто не попадает на горящий материал, а того количества, которое все же входит в контакт с горящим ЛГМ, хватает для тушения. Для обеспечения тушения необходимо некоторое минимальное количество ОС, а, в связи с этим, подача большего количества не дает вклада в повышение эффективности тушения. Таким образом, минимальное требуемое количество ОС на основе ГА, расходуемое на тушение, обеспечивается ГА с концентрацией в пределах 3,5-7 г/л.

Если учесть длину потушенной кромки и ее хотя бы ее приблизительную ширину, тогда можно оценить действительную площадь, на которую был подан исследуемый ОС, что составило 0,25-0,3 кг/м<sup>2</sup>.

Определив среднюю массу горючих материалов растительного происхождения на исследуемых участках в 0,7-1,1 кг/м<sup>2</sup>, появляется возможность рассчитать расход ОС на единицу массы природного горючего материала (см. табл. 1). Это значение в ходе эксперимента с применением в качестве ОС ГА (3,5-7,0 г/л) составило 0,27-0,36 кг/кг. Ориентируясь на низшую теплоту сгорания соломы, которая при 20 % влажности составляет 13,5 МДж/кг [19], можно рассчитать энергию горения, которую способна поглотить единица массы ОС. Полученные результаты представлены в табл. 1. Следует учесть, что в столбцах 5 и 6 (табл. 1) представлены данные, полученные сочетанием из эксперимента и известных литературных значений, которые несут в себе некоторый условный характер. Если предположить (довольно условно) общую огнетушащую способность как сумму огнетушащих эффектов, складывающих процесс тушения, тогда можно хотя бы приблизительно рассчитать вклад изоляции и ингибирования, которыми обладает ОС на основе ГА. Вычитая из общего вклада в огнеподавление, который обеспечивает ГА (7 г/л), который способен противостоять тепловыделению 52,5 МДж/кг, вклад, который дает водопроводная вода (21,5 МДж/кг), получаем, что общий вклад в тушение путем изоляции и ингибирования позволяет бороться с тепловыделением в 30 МДж/кг, или 57 % против 43 % энергии, поглощаемой водой.

ГА является водным раствором, содержащим несколько растворенных компонентов. Это собственно, сам ГА, ионы кальция, магния, калия, натрия, гидрокарбонат-ионы и т. п., содержащиеся в природной, а следовательно, и в водопроводной воде, кроме этого в растворе присутствуют другие продукты гидролиза – сульфат-ионы и т. п. Для выявления вклада в огнетушащий эффект именно присутствия в ОС соединений алюминия были проведены дополнительные испытания с применением насыщенного раствора карбоната натрия (сода) и сульфата натрия (28 г/л). Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что эффективность применения обоих ОС не отличается от эффективности применения водопроводной воды в условиях эксперимента.

Определение расхода ОС при тушении кромки пожара (собственные экспериментальные результаты и расчеты авторов с применением данных работы [19] по низшей теплоте сгорания соломы)

Наименование ОС	N	Расход ОС на периметр, кг/м	Расход ОС на площадь, кг/м <sup>2</sup>	Расход ОС на массу природного горючего материала, кг/кг	Абсорбция энергии горения единицей массы ОС, МДж/кг
Вода	24	0.22±0.05	0.50±0.10	≈0.63	≈21.5
Гидрогель алюминия (1,7 г/л)	3	0.19±0.09	0.56±0.15	≈0.54	≈24.9
Гидрогель алюминия (3,5 г/л)	3	0.1±0.04	0.24±0.12	≈0.29	≈47.3
Гидрогель алюминия (7 г/л)	3	0.09±0.04	0.25±0.10	≈0.26	≈52.5
Гидрогель алюминия (14 г/л)	3	0.11±0.03	0.23±0.11	≈0.31	≈43.0
Гидрогель алюминия (28 г/л)	3	0.10±0.05	0.22±0.09	≈0.29	≈47.3
Гидрогель алюминия (7 г/л) через 60 мин после получения	3	0.25±0.04	0.61±0.07	≈0.71	≈18.9
Сульфат натрия (28 г/л)	3	0.23±0.04	0.55±0.12	≈0.66	≈20.5
Карбонат натрия (насыщенный раствор)	3	0.25±0.09	0.49±0.18	≈0.71	≈18.9

При реализации в ходе тушения кромки природного пожара одновременно нескольких огнеподавляющих эффектов (охлаждения, изоляции и, по видимому, ингибирования) чрезвычайно трудно выделить вклад каждого из них в процесс прекращения горения. Тем не менее, в ходе проведения полевого эксперимента неоднократно отмечалось, что при применении ГА с повышением его концентрации в водном растворе наблюдалось все меньше участков для проведения операции дотушивания, а также наблюдалось меньшее выделение остаточного дыма после ликвидации пламенного горения. Аналогичный эффект наблюдался при применении ГА для тушения модельного очага пожара [16]. Это, хотя и косвенно, свидетельствует о реализации процесса подавления горения на атомно-молекулярном уровне и активной борьбой с очагами тления, находящимися в объеме природного горючего материала, что доставляет немало хлопот и создает множество проблем при тушении низовых природных пожаров.

ГА – «скоропортящийся продукт», поэтому для проверки его действия при длительном хране-

нии была проведена серия экспериментов в условиях распада его коллоидного раствора и выпадения кристаллического осадка гидроксида алюминия в осадок на дно и стенки емкости ранцевого огнетушителя. Результаты табл. 1 свидетельствуют, что спустя 60 минут после приготовления гидрогеля он, как и предполагалось, полностью теряет свою эффективность, т. к. расходы такого ОС на тушение единицы длины кромки низового пожара не отличаются от таковых для водопроводной воды.

### Выводы

В результате проведенных исследований выявлено следующее:

1. Подобран оптимальный способ получения ГА и его минимально необходимая концентрация в водном растворе, отвечающая минимальному расходу ОС для тушения кромки низового пожара.

2. Оказалось, что наибольшей огнетушащей способностью и минимальной концентрацией обладает ГА с концентрацией в диапазоне 3,5-7 г/л, полученный гидролизом сульфата алюминия в воде при его растворении. Использование более высококонцентрированных водных растворов ГА

не приводит к существенному уменьшению расхода огнетушащего вещества, а снижение концентрации ГА ниже 3,5 г/л в водном растворе, наоборот, приводит к перерасходу ОС. Это происходит, по-видимому, из-за наличия предела огнетушащей способности ОС, которой обладают ГА с концентрациями 3,5-7 г/л. Сравнение результатов тушения ГА с аналогичными результатами для других применяемых ОС: карбонат натрия и сульфат натрия – показало превосходство ГА над ними, обусловленное его составом и физико-химическими свойствами.

3. Таким образом, проведенные полевые исследования показывают, что предлагаемое ОС на

основе ГА является эффективным для тушения низовых пожаров. В среднем преимущество применения ГА в удельном расходе составляет 2-2,5 раза. Данное огнегасящее средство пригодно как для работ на открытой местности, так и в закрытых помещениях, а также является недорогим и удобным для использования в ранцевых огнетушителях или подачи в зону горения стандартным противопожарным оборудованием: пожарными насосами, рукавами, стволами. Тем не менее, экспериментально установлено, что ГА довольно быстро теряет свою огнетушащую эффективность, поэтому его применение необходимо совмещать с его получением.

### Библиографический список

1. Полевой справочник лесного пожарного. – URL: <http://www.forestforum.ru/info/fireman.pdf>.
2. Справочник добровольного лесного пожарного. URL: <https://aviales.ru/files/documents/2013/02/spravochnik.pdf>.
3. Захватов, В. Д. Современные перспективные методы тушения лесных пожаров / В.Д. Захватов, М. В. Синельников // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2013. – № 5–6. – С. 101–109.
4. Бакач, В. А. Эффективность грунтомета при локализации и тушении лесных пожаров / В. А. Бакач, Д. А. Беляев // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2019. – № 13. – С. 227–233. – DOI: 10.12737/14168.
5. Гундар, С. В. Интенсивность подачи воды на тушение кромки низовых лесных пожаров / С. В. Гундар, А. Н. Денисов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 7. – С. 80–85.
6. Бобков, С. А. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / С. А. Бобков, А. В. Бабурин, П. В. Комраков. – Москва : Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.
7. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб. пособие / С. С. Тимофеева [и др.]. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2013. – 178 с.
8. Jimenez, M. Intumescent fire protective coating: Toward a better understanding of their mechanism of action / M. Jimenez, S. Duquesne, S. Bourbigot // *Thermochimica Acta*. – 2006. – Vol. 449. – P. 16–26. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.07.008>.
9. Liodakis, S. Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of *Pinus halepensis* needles / S. Liodakis, D. Vorisis, I. P. Agiovlasis // *Thermochimica Acta*. – 2006. – Vol. 444. – P. 157–165. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.03.010>.
10. Liodakis, S. Testing the fire retardancy of Greek minerals hydromagnesite and huntite on WUI forest species *Phillyrea latifolia* L. / S. Liodakis, I. Antonopoulos, I. P. Agiovlasis, T. Kakardakis // *Thermochimica Acta*. – 2008. – Vol. 469. – P. 43–51. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.12.010>.
11. Bakirtzis, D. Fire retardancy impact of sodium bicarbonate on ligno-cellulosic materials / D. Bakirtzis, M. A. Delichatsios, S. Liodakis, W. Ahmed // *Thermochimica Acta*. – 2009. – Vol. 486. – P. 11–19. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.12.012>.
12. Zhang, P. Synergistic effect of iron and intumescent flame retardant on shape-stabilized phase change material / P. Zhang, Y. Hu, L. Song, H. Lu, J. Wang, Q. Liu // *Thermochimica Acta*. – 2009. – Vol. 487. – P. 74–79. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.01.006>.

13. Bakirtzis, D. ATR investigation of the mass residue from the pyrolysis of fire retarded lignocellulosic materials / D. Bakirtzis, V. Tsapara, S. Liidakis, M. A. Delichatsios // *Thermochimica Acta*. – 2012. – Vol. 550. – P. 48–52. – <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.08.010>.

14. Perez-Moreno, S. M. Thermal characterization of new fire-insulating materials from industrial inorganic TiO<sub>2</sub> wastes / S. M. Perez-Moreno, M. J. Gazquez, A. G. Barneto, J. P. Bolivar // *Thermochimica Acta*. – 2013. – Vol. 552. – P. 114–122. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.10.021>.

15. Aluminium diethylphosphinate versus ammonium polyphosphate: A comprehensive comparison of the chemical interactions during pyrolysis in flame-retarded polyolefine/poly(phenylene oxide) / A. Sut, S. Greiser, C. Jager, B. Schartel // *Thermochimica Acta*. – 2016. – Vol. 640. – P. 74–84. – DOI: 10.1016/j.tca.2016.08.004.

16. Ивченко, О. А. Тушение лесных горючих материалов гидрогелями на основе гидроксида алюминия / О. А. Ивченко, К. Е. Панкин // *Лесотехнический журнал*. – 2019. – Т. 33. – № 1. – С. 76–84. – DOI: 10.12737/article\_5c92016e1314b2.49705560.

17. Опрыскиватель «ЖУК». Паспорт. – URL: <https://poryadok.ru/upload/iblock/628/6286d584b7ca5b055d8701c3071021d3.pdf> (дата обращения 08.01.2020).

18. Справочник химика / под ред. Б. П. Никольского. – Ленинград : Химия, 1971. – Т. 2. – 1168 с.

19. Справочник потребителя биотоплива / В. Варес, Ю. Касък, П. Муйсте, Т. Пиху, С. Соосаар ; под ред. В. Вареса. – Таллинн : Таллиннский технический университет, 2005. – 183 с.

### References

1. *Polevoj spravochnik lesnogo pozhnogo* [Wild fireman handbook]. URL: <http://www.forestforum.ru/info/fireman.pdf> (In Russian) (accessed 01 November 2018).

2. *Spravochnik dobrovol'nogo lesnogo pozhnogo* [Wild fireman volunteer handbook]. URL: <https://aviales.ru/files/documents/2013/02/spravochnik.pdf> (In Russian) (accessed 01 November 2018).

3. Zahvatov V.D., Sil'nikov M.V. (2013) *Sovremennye perspektivnye metody tusheniya lesnyh pozharov* [Modern and perspective methods for wild fire extinguishing]. *Voprosy oboronnoj tehniki. Seriya 16. Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu* [ Topics of defence equipment design Series 16. Terrorism protection equipment], No 5-6, pp. 101-109 (in Russian).

4. Bakach V.A., Beljaev D.A. (2019) *Jeffektivnost' gruntometa pri lokalizacii i tushenii lesnyh pozharov*. Nauchno-obrazovatel'nyj potencial molodezhi v reshenii aktual'nyh problem XXI veka [Scientific and educational ability of young scientists for actual problem of XXI century solving]. № 13. P. 227-233 (in Russian). DOI: 10.12737/14168.

5. Gundar S.V., Denisov A.N. (2014) *Intensivnost' podachi vody na tushenie kromki nizovyh lesnyh pozharov* [Intensity of water flow for fire extinguishing of ground cover fire]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and Explosion Safety]. T.23, № 7. P.80-85 (in Russian).

6. Bobkov S.A. *Fiziko-himicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physical and chemical basis of fires and fire extinguishing]. Moscow, 2014, 210 p. (In Russian).

7. *Fiziko-himicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov: A Tutorial* [Physical and chemical basis of fires and fire extinguishing]. Irkutsk, 2013, 178 p. (In Russian).

8. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. (2006) Intumescent fire protective coating: Toward a better understanding of their mechanism of action. *Thermochimica Acta*, Vol. 449, pp. 16-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.07.008>.

9. Liidakis S., Vorisis D., Agiovlasis I.P. (2006) Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of *Pinus halepensis* needles. *Thermochimica Acta*, Vol. 444, pp. 157–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.03.010>.

10. Liodakis S., Antonopoulos I., Agiovlasis I.P., Kakardakis T. (2008) Testing the fire retardancy of Greek minerals hydromagnesite and huntite on WUI forest species *Phillyrea latifolia* L. *Thermochimica Acta*, Vol. 469, pp. 43-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.12.010>.
11. Bakirtzis D., Delichatsios M.A., Liodakis S., Ahmed W. (2009) Fire retardancy impact of sodium bicarbonate on ligno-cellulosic materials. *Thermochimica Acta*, Vol. 486, pp. 11-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.12.012>.
12. Zhang P., Hu Y., Song L., Lu H., Wang J., Liu Q. (2009) Synergistic effect of iron and intumescent flame retardant on shape-stabilized phase change material. *Thermochimica Acta*, Vol. 487, pp. 74-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.01.006>.
13. Bakirtzis D., Tsapara V., Liodakis S., Delichatsios M.A. (2012) ATR investigation of the mass residue from the pyrolysis of fire retarded lignocellulosic materials. *Thermochimica Acta*, Vol. 550, pp. 48-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.08.010>.
14. Perez-Moreno S.M., Gazquez M.J., Barneto A.G., Bolivar J.P. (2013) Thermal characterization of new fire-insulating materials from industrial inorganic TiO<sub>2</sub> wastes. *Thermochimica Acta*, Vol. 552, pp. 114-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.10.021>.
15. Sut A., Greiser S., Jager C., Schartel B. (2016) Aluminium diethylphosphinate versus ammonium polyphosphate: A comprehensive comparison of the chemical interactions during pyrolysis in flame-retarded polyolefine/poly(phenylene oxide). *Thermochimica Acta*, Vol. 640, pp. 74-84. DOI: 10.1016/j.tca.2016.08.004.
16. Ivchenko O.A., Pankin K.E. (2019) *Tushenie lesnyh gorjuchih materialov gidrogeljami na osnove gidroksida aljuminija* [Fire extinguishing of forest flammable materials by hydrogels based on aluminum hydroxide]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 9, No. 1 (33), pp. 76-84 (in Russian). DOI:10.12737/article\_5c92016e1314b2.49705560.
17. *Opryskivatel' "ZHUK"* [Agricultural Sprinkler "Beetle"]. *Pasport* [Technical certificate] URL: <https://poryadok.ru/upload/iblock/628/6286d584b7ca5b055d8701c3071021d3.pdf> (Date of access: 08.01.2020).
18. *Spravochnik himika* [Chemical directory]: in 7 vol. Vol. 2. Leningrad, 1966, 1168 p.
19. Vares V. (ed.) Handbook of the consumer of biofuel. Tallinn, TPU, 2005, 173 p.

### Сведения об авторах

*Ивченко Ольга Александровна* – аспирант факультета инженерии и природообустройства ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова», г. Саратов, Российская Федерация; e-mail: [olgalexan@yandex.ru](mailto:olgalexan@yandex.ru).

*Панкин Кирилл Евгеньевич* – кандидат химических наук, доцент ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова», г. Саратов, Российская Федерация; e-mail: [texmexium@mail.ru](mailto:texmexium@mail.ru).

### Information about authors

*Ivchenko Olga Aleksandrovna* – post-graduate student of the Department of Technosphere Safety and Transport-Technology Machines, FSBEI HE "Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov", Saratov, Russian Federation, e-mail: [olgalexan@yandex.ru](mailto:olgalexan@yandex.ru).

*Pankin Kirill Evgenyevich* – PhD (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technosphere safety and Transport-Technology machines, FSBEI HE "Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov" Saratov, Russian Federation; e-mail: [texmexium@mail.ru](mailto:texmexium@mail.ru).