

# Разработка и применение синтетических N-P-содержащих дисперсий для предотвращения и тушения лесных и торфяных пожаров (обзор)

© В.В. Богданова ✉, О.И. Кобец

Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Ленинградская, 14)

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проведен анализ огнезащитных и огнетушащих средств, применяемых для предупреждения и тушения пожаров в природном комплексе. Показано, что в настоящее время отсутствуют атмосферостойкие, экологичные и экономичные средства, способные одновременно прекращать горение древесины и торфа.

**Цель и задачи.** Разработка экономичного и экологичного синтетического средства, обладающего одновременно огнезащитным и огнетушащим действиями по отношению к природным горючим материалам.

**Материалы и методы.** Объектом исследования являлись синтетические дисперсии аммонийных фосфатов двух- и трехвалентных металлов и огнезащищенные ими древесина и торф. Исследованы физико-химические свойства продуктов синтеза в сопоставлении с их огнезадерживающей эффективностью. Огнезащитные, огнетушащие и физико-химические свойства синтезированных продуктов определяли с использованием регламентированных ГОСТами методов термического и химического анализа, сканирующей электронной микроскопии и собственных оригинальных методик.

**Результаты и их обсуждение.** С применением полного факторного эксперимента оптимизирована рецептура синтетического средства «Комплексил», эффективного при тушении и огнезащите древесины и торфа. Одновременно установлен общий для природных горючих материалов доминирующий процесс ингибирования горения — поступление летучих азотсодержащих продуктов в газовую фазу. Определены атмосферостойкие (сохранение огнезащитных свойств на лесных горючих материалах при выпадении 79 мм осадков) и лесоводственно-экологические (улучшение условий минерального питания и роста лесных фитоценозов) свойства состава «Комплексил».

**Выводы.** Разработан синтетический экономичный состав на основе природного минерального сырья, проявляющий огнезащитную и огнетушащую эффективность при защите лесных горючих материалов и торфа. Проведены испытания разработанного средства при тушении реальных природных пожаров, определена его атмосферостойкость и установлена положительная реакция лесных фитоценозов на применение состава комплексного действия. Использование «Комплексила» позволяет снизить временные затраты и расход огнетушащего средства при тушении природных пожаров, что значительно уменьшает материальный ущерб.

**Ключевые слова:** огнезащита; огнетушение; ингибирование горения; фосфаты; дисперсии

**Для цитирования:** Богданова В.В., Кобец О.И. Разработка и применение синтетических N-P-содержащих дисперсий для предотвращения и тушения лесных и торфяных пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 5–27. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.5-27

✉ Богданова Валентина Владимировна, e-mail: bogdanova@bsu.by

## Development and application of synthetic NP dispersions to prevent and extinguish forest and peat fires (Review)

© Valentina V. Bogdanova ✉, Olga I. Kobets

Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (Leningradskaya St., 14, Minsk, 220006, Republic of Belarus)

## ABSTRACT

**Introduction.** The analysis of flame retardants and extinguishing agents used for preventing and extinguishing fires in an ecosystem is carried out. It is shown that at present there are no weatherproof, environmentally friendly and cost effective extinguishing agents capable of stopping wood and peat burning.

**Purpose and objectives.** Development of cost effective and environmentally friendly synthetic agents capable of both flame retarding and extinguishing natural combustible materials.

**Materials and methods.** Synthetic dispersions of ammonium phosphates of two- and three-valence metals, as well as wood and peat fireproofed by them are the object of the study. Physical and chemical properties of synthesis products in comparison with their fire retarding efficiency are examined. Fireproofing, fire extinguishing, as

well as physical and chemical properties of synthesized products are determined using GOST-regulated methods of thermal and chemical analysis, scanning electron microscopy and original methods.

**Results and discussion.** The formulation of Kompleksil synthetic compound effective in extinguishing and fireproofing wood and peat is optimized using a full factorial experiment. At the same time, the inflow of volatile nitrogen containing products into the gaseous phase is identified as the dominating burning inhibition process common for natural combustible materials. The weather resistance (preservation of fireproof properties in respect of forest combustible materials at 79 mm precipitation), forest and environment enhancement (improvement of mineral nutrition conditions and growth of forest plant communities) properties of Kompleksil compound are identified.

**Conclusions.** A cost effective synthetic compound based on natural mineral materials showing fireproofing and extinguishing efficiency when protecting forest combustible materials and peat is developed. This compound was tested in the process of extinguishing real wildfires; its weather resistance is identified, and the positive response of forest plant communities to the application of this multiple action compound is registered. The use of Kompleksil allows to reduce time expenditures and fire extinguishing agent consumption when extinguishing wildfires, which significantly reduces material damage.

**Keywords:** fireproofing; fire extinguishing; burning inhibition; phosphates; dispersions

**For citation:** Bogdanova V.V., Kobets O.I. Development and application of synthetic NP dispersions to prevent and extinguish forest and peat fires. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):5-27. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.5-27 (rus).

✉ Valentina Vladimirovna Bogdanova, e-mail: bogdanova@bsu.by

## Введение

Борьба как с природными пожарами, так и с горючестью деревянных строительных конструкций остается актуальной вследствие социальных, экологических и экономических проблем [1–5]. Горение твердых горючих материалов (ТГМ), к которым относятся древесина и торф, — сложный физико-химический процесс, сопровождающийся протеканием последовательно-параллельных превращений в конденсированной и газовой фазах. Одновременно эти природные полимеры склонны к беспламенному горению — тлению и, как следствие, к повторному воспламенению [6–9], что является причиной распространения природных пожаров на большие расстояния. Так как природные горючие материалы (древесина и торф) представляют собой системы, характеризующиеся надмолекулярной структурой, влагосодержанием, отклонением химического состава от среднестатистического, наличием примесей, до сих пор не установлены факторы, оказывающие доминирующее влияние на прекращение их горения [10, 11]. Это затрудняет направленное создание замедлителей горения для конкретного ТГМ.

Трудность предотвращения и тушения лесных и подземных пожаров обусловлена существенным различием химического состава и физико-химических свойств этих ТГМ. Основными компонентами лесных горючих материалов (ЛГМ) являются целлюлоза (50...55 %) и лигнин (25 %), другими составляющими древесины (17...26 %) являются смолы и эфирные масла [8, 11, 12]. Органические вещества торфа состоят из битумов (до 17 %), гуминовых и фульвовых кислот (24,7...40 % и 15,5...16,6 %, соответственно), целлюлозы (2,4...7,3 %) и негидролизуемого остатка (7,4...12,3 %) [13, 14]. Различие в химическом составе ЛГМ и торфа ощутимо ска-

зывается на их физико-химических и термических свойствах [15–17].

Процессу горения ТГМ предшествует целый ряд стадий, начиная с подсушки горючего материала и заканчивая превращением их в газообразное состояние. В работах [18, 19] выделено несколько стадий разложения древесины. При температуре от 110 до 115 °C происходит интенсивное испарение капиллярной и адсорбированной воды. При 150...200 °C выделяется углекислый газ, а при температуре более 200 °C начинают разлагаться целлюлоза и лигнин, этот процесс достигает максимума при температурах 275...300 °C. При температурах 400...430 °C процесс разложения древесины и выделение горючих газов завершается, древесина обугливается, и при 500 °C на ее поверхности протекает горение угля.

Термолиз торфа, так же как и древесины, происходит ступенчато, согласно поочередному разложению составляющих его компонентов. В отличие от древесины торф менее термостоек — его деструкция начинается уже при 100...160 °C с деструкции водорастворимых и легкогидролизуемых компонентов [20, 21]. При температурах 200...350 °C происходит пиролиз периферической части молекул гуминовых кислот, а выше 350 °C пиролизуется их центральная часть [22]. Согласно ЯМР-исследованию [23], с повышением температуры до 500 °C начинается разрушение ароматических структур вещества торфа. Отсюда следует, что при разработке огнезащитных и огнетушащих средств (ОС) для древесины и торфа необходимо учитывать различия температурных интервалов их термического разложения и физико-химических свойств этих природных горючих материалов.

Потухание ТГМ обусловлено резким уменьшением скорости химических реакций в результате изменения условий тепло- и массопереноса между пламенной зоной и пиролизуемыми в конденсированной фазе материалами [24]. Так, прекращение горения возможно в результате применения следующих способов [25–29]: использования жидких и газообразных охлаждающих агентов; создания на поверхности исходного или горящего материала термоизолирующего покрытия или расплава; применения веществ, изменяющих условия термического разложения целлюлозосодержащих природных горючих материалов преимущественно до карбонизованного остатка и воды, а также реагентов, способных к испарению и разложению при нагревании с образованием продуктов, разбавляющих пламенную зону инертными газами и связывающими активные частицы, ответственные за развитие процесса горения.

Наиболее распространенным способом тушения природных пожаров является применение чистой воды и воды с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ), смачивателей и/или пленкообразующих полимерных агентов [30–33]. Известно [34, 35], что эффективность применения воды возрастает при ее подаче на очаг в тонкораспыленном виде за счет более высокого охлаждающего эффекта мелких капель жидкости. Такой способ тушения не эффективен для древесных горючих материалов, а тем более для торфа вследствие кратковременности действия, низкой способности подавления тления и смачиваемости подсушенного торфа и древесины в зоне, прилегающей к очагу горения, а также из-за невозможности обеспечения требуемого расхода и интенсивности подачи воды на очаг горения. Использование порошковых огнетушащих средств также неэффективно по причине их высокого расхода ( $5...6 \text{ кг/м}^2$ ) при отсутствии гарантии прекращения горения и тления ТГМ [3, 36].

Для снижения расхода воды и увеличения ее эффективности предлагается использовать различные минеральные добавки ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ , бентонит, бишофит, шунгит  $[\text{Mg}_3\text{Ca}(\text{CO}_3)_4]$ , гидромагнетит  $[\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ ) [37, 38]. Авторами [4] для снижения горючести древесины предложено использовать комплексный подход: обработку древесины пропиточными антипиреновыми составами, а затем дисперсионными средствами изолирующего действия. При этом установлено снижение времени ликвидации пламенного горения, тогда как данные о расходах этих дисперсий на огнезащиту и тушение древесины отсутствуют.

Авторами [39–41] предложено применять быстротвердеющую кремнийсодержащую пену как для тушения лесных горючих материалов, так и для

прокладки противопожарных заградительных полос. Недостатками этих огнезащитно-огнетушащих средств являются высокая стоимость и сложная технология их получения — смешивание агентов, находящихся в различных емкостях, непосредственно перед применением. Все перечисленное относится и к пенам, получаемым на основе карбамидно-формальдегидной смолы при добавлении серной кислоты [42]. Быстротвердеющие пены не пригодны для локализации и тушения торфяных пожаров, которые протекают под землей.

В работах [43, 44] предприняты попытки повысить эффективность тушения лесных горючих материалов водой путем увеличения ее вязкости и изолирующей способности путем добавления веществ охлаждающего и/или загущающего действия. Исходя из полученных данных, эффективность тушения водой при повышении ее вязкости, добавлении гидроксида алюминия, бишофита или бентонита увеличивалась, однако наблюдения за отсутствием или наличием тления после тушения не проводились. Изолирующие покрытия вспучивающегося типа [45–47] для огнезащиты и тушения лесных горючих материалов не применялись.

Кроме применения воды, одним из наиболее распространенных способов огнезащиты и тушения лесных горючих материалов является применение растворов неорганических, органических азот-фосфорсодержащих соединений или их смесей [48–55], однако тушение торфа с применением химических огнетушащих средств до наших работ не проводилось. Из-за конечных свойств соединений, входящих в известные огнезащитно-огнетушащие составы, проблематично создать средство, адресно воздействующее на доминирующие процессы, вносящие основной вклад в изменение условий тепло- и массообмена между пламенной зоной и подвергающимися пиролизу в конденсированной фазе твердыми горючими материалами. В свою очередь, отсутствие объектов с регулируемыми физико-химическими параметрами, обладающих ингибирующими горение свойствами по отношению к разным по химической природе материалам — древесине и торфу, сдерживает получение информации об общности или различии подходов к прекращению их горения и о факторах, оказывающих определяющее влияние на эффективность огнезащиты и тушения природных горючих материалов, склонных к тлению и повторному воспламенению.

В зависимости от физического состояния и химического состава горючего вещества механизм прекращения горения может быть разным [56–59]. Ингибирование горения ТГМ может осуществляться физическими и химическими методами за счет изменения как условий тепло- и массопереноса, так

и скорости и направления химических реакций. Из литературных данных применительно к природным горючим материалам до настоящего времени преобладающей точкой зрения относительно механизма действия замедлителей горения на потухание ТГМ является ускорение образования угольного остатка, обладающего термоизолирующим действием [32, 56–60]. В работах [60–64] наряду с катализом образования карбонизованных продуктов термолитиза древесины ингибиторами горения отмечается дополнительная роль продуктов взаимодействия компонентов антипиреновой системы, которые при горении древесины формируют на ее поверхности термостабильные структуры. Согласно [65], прекращение горения целлюлозосодержащих материалов обусловлено ингибированием радикальных процессов в газовой фазе. По мнению авторов [66–68], наряду с процессами каталитической дегидратации древесины преимущественно до карбонизованного остатка в присутствии замедлителей горения происходит ингибирование радикальных реакций в пламенной зоне.

В соответствии с разнообразными точками зрения на механизм ингибирования горения древесины и лесных горючих материалов, обусловленных в основном результатами термических и калориметрических исследований древесины, огнезащитных составах различной эффективности, до настоящего времени не выявлена доминирующая стадия прекращения их горения, что не позволяет осуществлять направленный подход к созданию огнетушащих и огнезащитных средств для природных горючих материалов.

При рассмотрении торфа как горючей системы необходимо знать, что он собой представляет с физико-химической точки зрения. В литературе по торфохимии [69] торф отнесен к классу сложных многокомпонентных полидисперсных систем. Сложность состава торфа связана с наличием в его объеме органической, минеральной и водной компонент. К важнейшим показателям физико-химических свойств торфа кроме его химического состава относятся его дисперсность, пористость, влажность и влагоемкость [69–71]. Для тушения торфяных пожаров последние два параметра наиболее важны, так как основным способом прекращения торфяного пожара до настоящего времени является создание влажности, при которой горение торфа прекращается — 69...72 % [70–72]. Тушение торфа, который существенно отличается от древесины по химическому составу, физико-химическим свойствам, температурам начала горения и скорости разложения [14, 16, 26, 71–75], до настоящего времени осуществляется водой или водой с добавлением ПАВ [76–78].

Таким образом, направленное создание и регулирование физико-химических и, соответственно, огнезащитно-огнетушащих свойств замедлителей горения проблематично без получения информации о процессах, протекающих при горении и термическом разложении огнезащитных составах различной эффективности горючих материалов как в конденсированной, так и в газовой фазах и их вкладе в прекращение горения природных горючих материалов. Особенность горения природных горючих материалов, состоящих в основном из органического вещества, заключается в их высокой склонности не только к горению, но и тлению, протекающему с выделением тепла в поверхностном слое конденсированной фазы. Тление — беспламенное горение — является причиной скрытого горения древесины и торфа, которое может перейти в режим пламенного горения. В соответствии с этим тушение лесных горючих материалов включает в себя стадию прекращения пламенного горения и стадию потухания тлеющих остатков, что необходимо учитывать при разработке средств тушения и огнезащиты.

Одновременно назрела необходимость создания ингибитора горения комплексного действия, эффективного при огнезащите и тушении разных по химической природе материалов — древесины и торфа. Немаловажное значение для масштабного применения средств огнезащиты и пожаротушения имеют атмосферостойкость, экономичность и экологичность этих средств, что усложняет выбор реагентов для синтеза и разработку технологии их получения и применения.

Ранее нами показана [50, 79] перспективность применения в качестве огнезащитных и огнетушащих средств для синтетических и природных полимеров фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония, образующих устойчивые дисперсии аморфных малорастворимых двойных фосфатов и имеющих широкий диапазон свойств. Это позволяет получать продукты, направленное воздействующие на процессы, протекающие при термическом разложении и горении ТГМ как в конденсированной, так и в пламенной зонах.

С целью разработки путей направленного создания огнезащитно-огнетушащих синтетических эффективных и экономичных замедлителей горения природных горючих материалов необходимо выявить факторы, оказывающие доминирующее влияние на прекращение горения древесины и торфа, что позволит регулировать химический состав и физико-химические свойства продуктов синтеза для адресного воздействия на процессы, ответственные за пламенное горение и тление. Выявление таких факторов возможно при проведении сопостави-



тельных исследований огнезащитно-огнетушащих свойств синтетических замедлителей горения с их физико-химическими свойствами, регулируемые на стадии получения в результате изменения природы исходных реагентов и условий проведения синтеза.

### Материалы и методы

Основными элементами, соединения которых проявляют антипирирующие свойства и экологически безвредны, являются азот, фосфор, бор, кремний, цинк, кальций и магний [80–83]. Исходя из данных о температурах, реализующихся в предпламенной зоне конденсированной фазы на различном удалении от поверхности горения (200...500 °C) древесины и торфа [11, 84–86], в данной работе для снижения затрат на локализацию и тушение как лесных, так и торфяных пожаров в качестве исходных реагентов для синтеза замедлителей горения, способных в этом температурном интервале образовывать изолирующие расплавы, вспененные структуры и летучие азот-фосфорсодержащие продукты, использовали недефицитное минеральное сырье следующего химического состава в пересчете на оксиды, % мас.: доломит — 30,0 CaO, 20,5 MgO, 1,7 SiO<sub>2</sub>, 0,4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; бентонит — 35,0 SiO<sub>2</sub>, 11,0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 27,3 CaO, 2,5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,1 TiO<sub>2</sub>; трепел — 70,0 SiO<sub>2</sub>, 11,5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,3 CaO, 0,7 MgO, 1,5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; брусит — 69,0 MgO. Выбор перечисленных природных реагентов обусловлен их химическим составом, так как на предыдущих этапах исследования [87, 88] с использованием чистых химических реагентов синтезированы металл-, кремний-, азот-фосфорсодержащие продукты с удовлетворительными огнетушащими и огнезащитными свойствами по отношению к древесине (ОС-1) или торфу (ОС-2). Эти составы использованы нами в качестве составов сравнения при определении огнезадерживающих свойств продуктов, получаемых на основе минерального сырья с целью создания средства, эффективного одновременно при огнезащите и тушении древесины и торфа.

Определить факторы, оказывающие доминирующее влияние на прекращение горения ТГМ, предполагалось путем варьирования состава реакционной смеси (природных минералов, модифицирующих и нейтрализующих агентов), а также условий проведения синтеза на основе сопоставительных исследований зависимости огнезащитной и огнетушащей эффективности получаемых продуктов от их физико-химических свойств. Получение такой информации необходимо для направленного регулирования свойств известных и создания новых эффективных и экономичных средств предупреждения и тушения природных по-

жаров. Одновременно при разработке рецептур ОС для различных по своей природе горючих материалов учитывалось различие их физико-химических и термических свойств: температура интенсивного разложения торфа составляет 180...300 °C, а древесины — 300...350 °C [6, 11].

С использованием золь-гель методики [88, 89] получены продукты с использованием доломита, брусита, бентонита или трепела, которые представляли собой устойчивые водные дисперсии фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония [90–93]. Для исследования выбран торф низинного типа с высокой степенью разложения (20...45 %). При оценке огнетушащей способности ОС по отношению к торфу с учетом его специфических свойств определяли зольность [93], потерю массы при горении и смачивающую способность ОС торфа различной влажности.

Огнезащитную эффективность этих же замедлителей горения для древесины устанавливали по ГОСТ 16363–98<sup>1</sup> с дополнительной фиксацией температуры отходящих газов, а эффективность тушения оценивали по лабораторной методике [94], учитывающей пожарную нагрузку и коэффициент поверхности горения нормативных очагов пожара класса А.

Атмосферостойкость (способность огнезащищенных образцов древесины после водных обработок сохранять устойчивость к воздействию огня) определяли по лабораторной методике [95], моделирующей выпадение осадков в объеме 34...40 мм, а также путем проведения испытаний огнезащитных полос в реальных условиях. Температурный профиль, реализующийся на поверхности и в приповерхностном слое (на глубине 5 см) исходного и огнезащищенного торфа при горении, выявляли по методике [96], где наблюдения проводили до полного остывания образцов. Изолирующую способность сравнивали по высоте образующегося вспененного каркаса при нагревании сухих ОС до 300...350 °C в течение фиксированного времени (40 мин). Температурный интервал выбран в соответствии с данными о температурах, реализующихся в предпламенной зоне конденсированной фазы на первой стадии термического разложения природных горючих материалов. Температуру начала плавления этих же ОС устанавливали, наблю-

<sup>1</sup> ГОСТ 16363–98. Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств: принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 13 от 28 мая 1998 г.); Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 25 сентября 1998 г. № 357 межгосударственный стандарт ГОСТ 16363–98 введен в действие непосредственно в качестве государственного стандарта Российской Федерации с 1 июля 1999 г.

дая за агрегатным состоянием сухих продуктов в изотермических условиях прогрева в интервале 150...200 °С в течение 10 мин. За температуру начала плавления ОС принимали температуру, выше которой в данных условиях наблюдалось образование расплава.

Растекаемость расплавов исследуемых продуктов синтеза как характеристику их вязкости и экранирующей способности находили по показателю растекаемости по ГОСТ Р 50045–92<sup>2</sup> [97] при нагревании составов сравнения и образцов ОС из минерального сырья (в виде таблеток массой по  $1,0 \pm 0,01$  г) в интервале температур 350...400 °С. Показатель растекаемости расплава по площади  $F_s$  вычисляли по формуле  $F_s = S_n/S_l$ , где  $S_n$  — площадь растекаемости расплава испытуемого состава, мм<sup>2</sup>;  $S_l$  — площадь растекаемости расплава сравнения (мм<sup>2</sup>). Теплопоглощающую способность выражали коэффициентом  $K_T = V_0/V_{OC}$ , где  $V_0$  — скорость остывания металлической пластины, нагретой до 360 °С;  $V_{OC}$  — скорость остывания этой же пластины с нанесенным на ее поверхность ОС.

Рентгенофазовый состав исходных ОС и продуктов их прогрева проводили на дифрактометре ДРОН-2 (Cu K $\alpha$  излучения). Микроструктуру поверхности исходной и огнезащитной древесины до и после водных обработок исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 1420 (Carl-Zeiss SMT AG, Германия). Данные получены при анализе реплик, снятых с внутренней поверхности сколов, сделанных вдоль волокон древесины на расстоянии 5 мм от поверхности образца. Дисперсность частиц нерастворимой части ОС исследовали с помощью автоматизированной системы АСТА-5, включающей в себя оптический микроскоп, телекамеру с выводом на монитор компьютера, который осуществляет статистическую обработку увеличенного изображения дисперсного материала. Размер коллоидных частиц в жидкой части суспензий устанавливали с помощью просвечивающего электронного микроскопа LEO 906 E (Carl-Zeiss SMT AG, Германия).

Образцы препарировали прямым методом на коллоидной пленке-подложке. Калориметрические данные (ДСК, ТГ) для синтезированных продуктов и огнезащитных ими образцов древесины и торфа сняты в интервале 20...600 °С (скорость подъема температуры 10 К/мин в атмосфере кислород/азот) на установке Netzsch STA 449 С. Теплопоглощающие свойства исследуемых образцов определяли как суммарную теплоту  $Q$ , Дж/г,

поглощенную в процессе физико-химических превращений в интервале температур 20...500 °С. Расчет проводили с применением программного приложения по площади комплексных пиков эндотермических эффектов при обработке кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Суммарное поступление азот- и фосфорсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу в пересчете на азот и фосфор ( $\Sigma\Delta N$  и  $\Sigma\Delta P$ ) определяли по разнице содержания азота и фосфора в граммах в пересчете на 100 г в исходных и огнезащитных образцах древесины и торфа, прогретых в интервале температур 200...500 °С в течение 10 мин. Температурный интервал соответствует температурам, реализующимся в конденсированной фазе на различном расстоянии от поверхности горения ТГМ, а временной интервал соответствует выходу в исследуемом температурном интервале кривых потери массы на плато, что необходимо для сопоставления полученных данных для ОС с различной эффективностью. Количество азота и фосфора в твердых продуктах термообработки огнезащитных опилок и торфа определяли микрохромовым методом Тюрина [98] и спектрофотометрическим методом [99] соответственно.

## Результаты и их обсуждение

Одной из особенностей торфяного материала является его низкая смачиваемость в результате подсушивания в зоне, прилегающей к фронту горения. Это приводит к нерациональному использованию воды, которая при тушении торфяного пожара уходит в дренаж. Для получения информации о влажности торфа, находящегося на различном удалении от фронта пламени в реальном очаге пожара, нами проведено определение влажности проб, взятых на различных расстояниях и глубине от кромки горения (табл. 1).

**Таблица 1.** Изменение влажности торфа в зависимости от расстояния и глубины отбора проб по отношению к фронту пламени

**Table 1.** Change in peat moisture content based on the distance and sampling depth in relation to the flame front

Расстояние от кромки пожара, м Distance from the fire edge, m	Относительная влажность, %, на глубине отбора проб, см Relative humidity, %, at the sampling depth, cm			
	0...5	10...20	40...50	60...70
Кромка / Edge	12,7	30,4	40,3	49,7
0,5	20,8	40,2	45,2	51,4
1,5	24,2	43,2	41,6	51,0
5,0	25,1	42,7	47,2	51,7

<sup>2</sup> ГОСТ Р 50045–92 (ИСО 4534–80). Эмали стекловидные. Определение характеристик текучести. Испытание на растекаемость: утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 23 июля 1992 г. № 761.

Найдено, что в возникшем очаге горения торф интенсивно подвергается поверхностной подсушке на достаточно большом расстоянии и глубине от кромки пламени. Экспериментами при поджигании торфа различной влажности установлено, что сухой торф после прекращения воздействия огня тлеет 40 мин, а торф влажности 17...18 % — 20 мин. Торф с 20 % влажностью способен впитать около 5 % воды, содержащей 0,3 % анионактивного ПАВ, тогда как при аналогичных испытаниях торф впитывает более 10 % ОС. Одновременно найдено, что применение ОС, в отличие от воды и воды с ПАВ, позволяет ликвидировать тление торфа. Этими экспериментами показано преимущество применения ОС по сравнению с водой и водой с ПАВ, заключающееся не только в существенно более низких расходах на тушение ТГМ, но и в ликвидации тления и предотвращении повторного возникновения пламенного горения.

Проведен синтез, исследованы термические и физико-химические свойства различных вариантов ОС с использованием природного минерального сырья [87, 90–93, 100, 101], представляющих собой суспензии, состоящие из твердой дисперсной фазы, распределенной в растворимой компоненте. Рентгенофазовым исследованием установлено, что дисперсная часть синтезированных продуктов рентгеноаморфна, а в растворимой части ОС обнаружен дигидрофосфат аммония ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) и в зависимости от природы используемых реагентов присутствуют фосфаты, сульфаты, хлориды аммония и/или калия. Следов исходных минеральных агентов в продуктах синтеза не обнаружено. Для всех

синтезированных продуктов установлены огнезащитная и огнетушащая эффективность по отношению к древесине и торфу с определением их комплексной эффективности.

Для дальнейших исследований отобран ряд составов, проявляющих различную огнезащитную и огнетушащую эффективность по отношению к прекращению горения природных горючих материалов (табл. 2). Варьирование химического состава и технологии получения синтезируемых продуктов предполагало изменение таких физико-химических свойств, влияющих на их огнезадерживающую эффективность, как температура начала плавления, вязкость расплавов, размер частиц твердой и жидкой составляющих ОС компонентов, устойчивость к воздействию влаги, термоизолирующая, теплопоглощающая способность, и поступление летучих азот- и фосфорсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу. Эти свойства ОС, реализующиеся в предпламенной зоне конденсированной фазы на различном удалении от поверхности горения, способны уменьшить скорость и количество поступления летучих горючих продуктов в пламенную зону. Для определения вклада газообразных ингибиторов в прекращение горения древесины и торфа в составе ОС изменяли содержание азота и фосфора. При этом предполагалось в результате проведения сопоставительных исследований физико-химических и огнепреграждающих свойств ОС найти факторы, вносящие определяющий вклад в ингибирование горения, и создать условия для реализации этих факторов.

**Таблица 2.** Химический состав ОС, огнезащитные и огнетушащие свойства по отношению к древесине и торфу

**Table 2.** Extinguishing agent chemical composition, fireproofing and fire extinguishing properties in relation to wood and peat

Состав Composition	Массовое соотношение компонентов ОС Mass ratio of FC components $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{ZnO} : \text{MgO} : \text{CaO} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{B}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 : \text{NH}_3 : \text{K}_2\text{O} : \text{SO}_3 : \text{HCl}$	Огнезащитная, огнетушащая эффективность / Fire retardant, fire extinguishing efficiency				
		Удельный расход на тушение древесины, $\text{dm}^3/\text{mg}$ Specific consumption for wood quenching, $\text{dm}^3/\text{mg}$	Температура отходящих газов при горении древесины, $^\circ\text{C}$ Temperature of waste gases during wood burning, $^\circ\text{C}$	Потеря массы при горении древесины $\Delta m_d, \%$ Weight loss during wood burning $\Delta m_w, \%$	Потеря массы при горении торфа $\Delta m_p, \%$ Weight loss during peat burning $\Delta m_p, \%$	Комплексная эффективность Comprehensive efficiency
ОС 1 FC 1	1 : 2,4 : 0 : 0 : 17,3 : 0 : 1 : 3,9 : 0 : 0 : 0	0,2	267	8,6	5,8	14,6
ОС 2 FC 2	1 : 2,4 : 0 : 0 : 30,3 : 0,4 : 1 : 8,9 : 0 : 0 : 0	0,3	254	10,0	5,1	15,3
ОС 3 FC 3	0,32 : 0 : 0 : 0,8 : 14,9 : 0 : 1 : 10,1 : 2,4 : 0 : 2,6	0,1	179	6,2	1,8	8,1
ОС 4 FC 4	0,17 : 0 : 0 : 0 : 8 : 0,1 : 2,5 : 5,6 : 5,9 : 0	0,2	269	18,8	2,9	21,9
ОС 5 FC 5	0,17 : 0 : 0,5 : 0 : 11,8 : 0 : 1 : 4,51 : 3,5 : 0 : 2,3	0,2	317	8,7	1,1	10,0

Состав Composition	Массовое соотношение компонентов ОС Mass ratio of FC components Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : ZnO : MgO : CaO : P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : SiO <sub>2</sub> : NH <sub>3</sub> : K <sub>2</sub> O : SO <sub>3</sub> : HCl	Огнезащитная, огнетушащая эффективность / Fire retardant, fire extinguishing efficiency				
		Удельный расход на тушение древесины, дм <sup>3</sup> /мг Specific consumption for wood quenching, dm <sup>3</sup> /mg	Температура отходящих газов при горении древесины, °C Temperature of waste gases during wood burning, °C	Потеря массы при горении древесины Δm <sub>д</sub> , % Weight loss during wood burning Δm <sub>н</sub> , %	Потеря массы при горении торфа Δm <sub>т</sub> , % Weight loss during peat burning Δm <sub>р</sub> , %	Комплексная эффективность Comprehensive efficiency
ОС 6 FC 6	0 : 0 : 0,7 : 1,03 : 13,6 : 0 : 0 : 6,65 : 0 : 0 : 2,9	0,2	275	4,2	4,2	8,6
Вода Water	—	0,5*	627	39,1	46,6	—
Вода + ПАВ Water + SAS	—	0,4*	627	39,0	47,0	—

\* Тление возобновляется

\* Smoldering resumes

Из полученных данных следует, что продукты, полученные из недефицитного минерального сырья, имеют различную комплексную эффективность, в связи с чем они представляют собой удобные объекты для выявления факторов, вносящих определяющий вклад в ингибирование горения древесины и торфа. По комплексной огнезащитной и огнетушащей эффективности синтезированные замедлители горения располагаются в следующий ряд: ОС 3 ≥ ОС 6 > ОС 5 > ОС 1 > ОС 2 > ОС 4. При этом для ОС 3 и ОС 6 характерна высокая эффективность как в случае древесины, так и в случае торфа, тогда как ОС 4 и ОС 5 при достаточно высокой эффективности по отношению к торфу менее эффективны при огнезащите древесины. Это обстоятельство учитывалось при выборе рецептуры состава комплексного действия.

Поскольку тление является причиной, затрудняющей борьбу с природными пожарами, проведены сопоставительные исследования температурных профилей в очагах горения древесины и торфа после тушения водой, водой с добавлением ПАВ и ОС-3 (табл. 3).

Как видно из полученных данных, только в случае применения ОС-3 удастся существенно снизить температуру на поверхности природных горючих материалов и не допустить возникновения тления.

Исследованием физико-химических и термических свойств (температура начала образования и коэффициент растекаемости расплава, теплопоглощающая способность, средняя высота вспененного слоя) индивидуальных ОС установлено [103, 104], что прямая корреляция между этими процессами, протекающими в предпламенной зоне конденсированной фазы, и огнепреграждающей эффективно-

стью ОС отсутствует. Аналогичный вывод следует из calorиметрических исследований огнезащищенных древесины и торфа, где обнаружено несоответствие ряда комплексной эффективности с величи-

**Таблица 3.** Изменение температуры на поверхности горения древесины и торфа в зависимости от времени после тушения и природы огнетушащего средства

**Table 3.** Temperature change of wood and peat burning surface based on the time after extinguishing and type of extinguishing agent

TGM SCM	Время после тушения, мин Time after extinguishing, min	Температура, °C при использовании средства тушения Temperature, °C w/extinguishing agent		
		вода water	вода – ПАВ water – SAS	ОС-3 FC-3
Торф Peat	5	100	100	90
	15	150	150	150
	30	350	340	300
	45	400	390	330
	60	450	450	390
	75	320	320	170
	90	250	250	45*
Древесина Wood	5	200	180	100
	10	400	380	50*
	15	590	590	20
	20	630	620	20

\* Тление отсутствует

\* Smoldering absent



ной суммарного тепловыделения, что не позволяет однозначно установить один из исследованных процессов, протекающих в предпламенной зоне конденсированной фазы, как определяющий для прекращения горения.

Вклад газозащитных процессов в ингибирование горения ЛГМ определяли сопоставительными количественными исследованиями поступления в пламенную зону суммарного количества летучих азот- и фосфорсодержащих продуктов, образующихся в температурном интервале 200...500 °С при термолизе древесины и торфа, огнезащитных составами различной комплексной эффективности (ОС 3, ОС 4, ОС 6) (табл. 4).

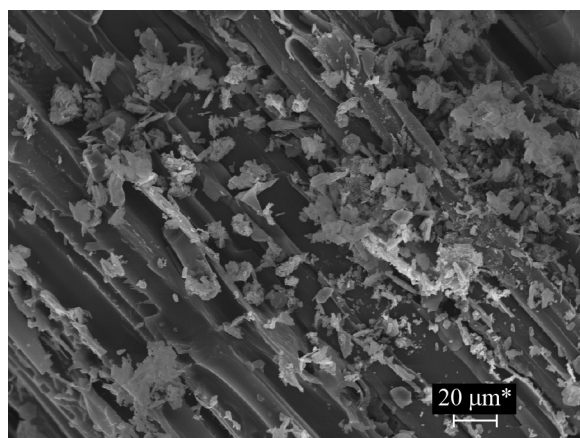
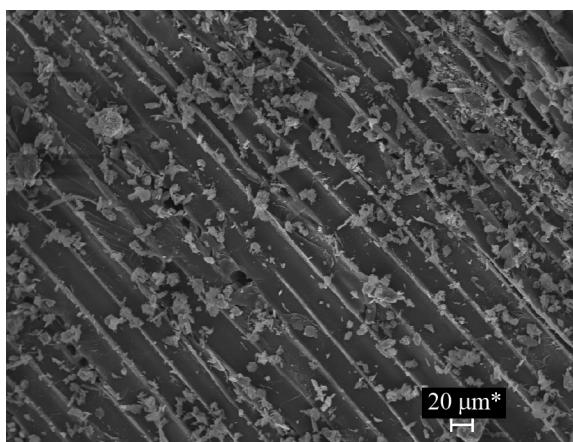
Данные о количественном поступлении летучих азот-фосфорсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу полностью совпадают с рядом комплексной эффективности ОС. Обращает на себя внимание тот факт, что суммарное количество летучих фосфорсодержащих продуктов в пламенную зону существенно меньше при близком суммарном содержании азота и фосфора в непрогретых огнезащитных образцах. Этот факт свидетельствует о преимущественном участии фосфора в процессах взаимодействия с полимерной матрицей при термическом разложении и горении огнезащитных ЛГМ. Напротив, данные об остаточном содержании азота в термообработанных в исследуемом температурном интервале образцах показывают практически полное его поступление в газовую фазу. Эти данные явились основанием для усовершенствования рецептуры ОС 3 путем изменения соотношения основных компонентов с использованием полного факторного эксперимента [102–105], в результате чего скорректирована рецептура исследуемого ОС в сторону повышения его эффективности путем увеличения в его составе N-содержащей компоненты. Полученные с применением математического аппарата результаты позволили подтвердить доминирующий фактор прекращения горения — инги-

бирование радикальных процессов в газовой фазе летучими азотсодержащими продуктами. Одновременно установлено, что азот в конденсированной фазе вступает во взаимодействие с фосфором и металлсодержащими компонентами минерального сырья с образованием каркасных термоизолирующих структур. Это позволяет утверждать, что в применении к ЛГМ синергизм синтетических азот-, металл- фосфорсодержащих соединений обусловлен изменением условий тепло- и массопереноса как в конденсированной, так и в газовой фазах.

Одним из важных эксплуатационных свойств огнезащитных средств, применяемых в природном комплексе, является их атмосферостойкость. Исходя из того, что исследуемые ОС представляют собой водные дисперсии, состоящие из частиц в микронном (нерастворимая составляющая) и нанодиапазоне (растворимая составляющая), проведены сопоставительные исследования размеров частиц ОС, проявляющих различную устойчивость к вымыванию [106, 107]. Найдено, что для наиболее стойкого к вымыванию ОС 6 характерно более высокое (в 1,5–1,6 раза) содержание мелкодисперсных частиц по сравнению с другими составами, что обеспечивает его более высокую проникаемость в пористую структуру древесины. Электронно-микроскопическими исследованиями срезов огнезащитной древесины на глубине до 2 мм после суточного выдерживания огнезащитных образцов в воде показано, что пористая структура древесины не просматривается (рис. 1). Это свидетельствует о прочном удерживании ОС 6 в поверхностном слое древесины. С этим утверждением согласуются данные по определению группы горючести выдержанных в воде образцов, которые сохранили первую группу огнезащитной эффективности. В соответствии с этим принято решение о том, что дальнейшие полигонные и натурные испытания атмосферостойкости, огнезащитной и огнетушащей эффективности по отношению к древесине и торфу проводить с использованием

**Таблица 4.** Суммарное поступление азота и фосфора в газовую фазу при термообработке огнезащитных древесины и торфа  
**Table 4.** Total nitrogen and phosphorus fed into gaseous phase during thermal treatment of fireproofed wood and peat

ОС EA	Содержание азота в непрогретом образце, г Nitrogen content in an unheated sample, g	Содержание фосфора в непрогретом образце, г Phosphorus content in an unheated sample, g	Суммарная потеря азота огнезащитными ЛГМ, г Total nitrogen loss by fireproofed HCM, g	Суммарная потеря фосфора огнезащитными ЛГМ, г Total phosphorus loss by fireproofed HCM, g	Комплексная эффективность Comprehensive efficiency
ОС 3 EA 3	14,2	15,8	23,2	4,2	8
ОС 4 EA 4	8,2	10,3	9,5	4,7	21,9
ОС 6 EA 6	10,0	7,3	17,2	2,6	8,6

*a**b*

**Рис. 1.** Микроструктура поверхности древесины (масштаб — 20 мкм в 1 см): *a* — огнезащитной; *b* — огнезащитной, после испытаний на атмосферостойкость

**Fig. 1.** Wood surface microstructure (scale — 20 μm in 1 cm): *a* — fireproof; *b* — fireproof after weather resistance testing

ОС 6, получившим торговое название «Комплексил». Устойчивость «Комплексила» к воздействию атмосферных осадков проводили с использованием модельных очагов пожаров, которые соответствовали различным видам ЛГМ (сосновых, вересковых, мшистых и лишайниковых). Для испытаний использовали 10 % раствор ОС с расходом 1,5...2,0 л/м<sup>2</sup>. Ширина огнезащитной полосы составляла 1,5 м, огнезащитный состав считался эффективным, если после воздействия атмосферных осадков глубина

распространения фронта огня не превышала четверти от ширины зоны огнезащитной полосы. Установлено, что за весь период испытаний при общем количестве выпавших осадков 79 мм огнезащитные полосы сохранили устойчивость к распространению огня (рис. 2).

Огнетушащую эффективность «Комплексила» в сопоставлении с водой и водой с ПАВ определяли при тушении очага ранга 2А с площадью свободной поверхности 9,36 м<sup>2</sup> (табл. 5).

*a**b**c*

**Рис. 2.** Полигонные испытания огнезащитной эффективности ОС «Комплексил». Огнезащитная полоса: *a* — до испытаний; *b* — во время испытаний; *c* — после испытаний

**Fig. 2.** Field testing of Kompleksil fireproofing efficiency. Fireproofing strip: *a* — before testing; *b* — during testing; *c* — after testing



**Таблица 5.** Огнетушательная эффективность «Комплексила» при тушении модельного очага ранга 2А

**Table 5.** Fire extinguishing efficiency of Kompleksil in the extinguishing of a model fire bed having 2A rank

Огнетушащее средство Extinguishing agent	Расход на тушение, дм <sup>3</sup> Agent consumption for extinguishing, dm <sup>3</sup>	Время тушения, с Extinguishing time, s	Время повторного воспламенения Reignition time
Вода / Water	10	44	500
Вода + 3 % ПАВ Water + 3 % SAS	8	35	510
«Комплексил» Kompleksil	3,3	26	—

Установлено, что тушение очага пожара класса А «Комплексилом» с гарантией отсутствия тления и повторного воспламенения осуществляется за более короткое время при меньшем (более чем в 2 раза) расходе ОС.

После тушения природного торфяника с исходной влажностью 38,2 % водой с ПАВ или «Комплек-

силом» проведены отборы проб торфа на различной глубине от поверхности горения с определением его влажности при использовании одного и того же количества (40 л) воды или ОС (табл. 6).

Установлено, что влажность торфа в небольшом поверхностном слое (5...20 см) не зависит от природы огнетушащего средства, однако, начиная с глубины более 20 см, его влажность при использовании воды с ПАВ снижается до уровня горимости. Наблюдение за очагами после тушения водой и «Комплексилом» проводилось в течение 3 сут. При использовании воды с добавкой ПАВ разогревание и тление торфа возобновилось, тогда как после применения «Комплексила» торфяной пожар был полностью локализован (рис. 3).

Применение химических средств огнезащиты и тушения пожаров в природном комплексе может оказать отрицательное влияние на лесные культуры. В соответствии с этим совместно с Институтом леса Национальной академии наук Беларуси проведены исследования по влиянию «Комплексила» на динамику содержания основных элементов питания в почве (азот, фосфор, калий) и в древесных растениях, а также на динамику показателей среднего диаметра и высоту культур сосны [108, 109].

**Таблица 6.** Изменение влажности торфа в зависимости от средства тушения

**Table 6.** Changes in peat moisture content depending on the extinguishing agent

Количество подач средства тушения Number of extinguishing agent feeds	Расход, л/м <sup>2</sup> Consumption, l/m <sup>2</sup>		Глубина отбора проб, см Sampling depth, cm	Влажность торфа, % Peat moisture content, %	
	вода + ПАВ water + SAS	«Комплексил» Kompleksil		вода + ПАВ water + SAS	«Комплексил» Kompleksil
1	11,7	10,9	0...5	56,1	58,2
2	9,2	10,2	6...10	59,5	58,4
3	9,5	9,7	11...20	62,2	67,3
4	9,6	9,2	21...30	43,0	75,4

*Примечание:* отбор проб осуществлялся на расстоянии 0,5 м от кромки пожара

*Note:* sampling is performed at the distance of 0.5 m from the fire edge



*a*



*b*



*c*

**Рис. 3.** Тушение торфяного пожара (а) и состояние торфяного очага через сутки после тушения водой с ПАВ (б) и «Комплексилом» (с)

**Fig. 3.** Peat fire extinguishing (a) and fire bed condition one day after the extinguishing using water with SAS (b) and Kompleksil (c)

По истечении пяти лет после применения ОС при прокладке огнезащитной полосы в посадке одно-летней хвой выявлено, что средняя высота деревьев на экспериментальном и контрольном участках составила 5,5...10 м и 5,3...9,8 м, соответственно, а средний прирост по диаметру 15-летних культур сосны после огнезащитной обработки увеличился на 47 % по сравнению с 37 % на контрольном участке. Полученные результаты свидетельствуют, что негативное влияние «Комплексила» на рост и развитие культур сосны отсутствует, при этом отмечено качественное улучшение условий их питания.

### Выводы

Таким образом, с использованием недефицитного минерального сырья разработана рецептура, технология получения и применения атмосферостойкого огнезащитно-огнетушащего состава «Комплексил», пригодного для борьбы с наземными и подземными природными пожарами. Установлен доминирующий фактор прекращения горения древесины и торфа — количественный выход летучих азотсодержащих продуктов в газовую фазу, что под-

тверждено методом полного факторного эксперимента. Это позволило повысить эффективность разрабатываемых продуктов синтеза при увеличении в них содержания азотсодержащей компоненты.

Одновременно с применением этого же метода обнаружено, что при ингибировании горения древесины и торфа наблюдается взаимное влияние факторов, проявляющееся в виде эффектов парного взаимодействия азота и фосфора, что свидетельствует о влиянии физических факторов, протекающих в предпламенной зоне конденсированной фазы, на условия тепло- и массопереноса, реализующееся при огневом воздействии на огнезащищенные природные твердые горючие материалы. Проведены полигонные и натурные испытания, где подтверждена высокая эффективность «Комплексила» не только в ликвидации пламенного горения, но и блокировании разогревания, что не менее важно для прекращения горения твердых горючих материалов, склонных к тлению и повторному воспламенению.

Проведением биометрических исследований огнезащищенных «Комплексилом» хвойных посадок в течение длительного периода показано положительное его влияние на рост лесных фитоценозов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гуцев Н.Д., Михайлова Н.В., Корчунова И.Ю.* Результаты сравнительных испытаний новых огнетушащих составов на модельных лесных пожарах // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2013. № 4. С. 40–52. URL: <http://journal.spb-niil.ru/pdf/4-2013/spbniil-proceedings-4-2013-4.pdf>
2. *Абдурагимов И.М.* Еще раз о государственной проблеме тушения крупных лесных пожаров (в России и во всем мире) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 2. С. 5–10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829837>
3. *Абдурагимов И.М.* Лесные пожары нельзя разбомбить // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 2. С. 64–68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829846>
4. *Popescu C.M., Pfriem A.* Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products — An overview // Fire and Materials. 2020. Vol. 44. No. 1. Pp. 100–111. DOI: 10.1002/fam.277
5. *Vakhitova L.N.* Fire retardant nanocoating for wood protection // Nanotechnology in Eco-efficient Construction. 2nd ed. Elsevier, 2019. Pp. 361–391. DOI: 10.1016/b978-0-08-102641-0.00016-5
6. *Гришин А.М., Якимов А.С.* Математическое моделирование теплофизических процессов при зажигании и тлении торфа // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 1. С. 151–167. URL: [https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120113&ARTICLE\\_ID=131296](https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120113&ARTICLE_ID=131296)
7. *Субботин А.Н.* О некоторых особенностях распространения подземного пожара // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76. № 5. С. 159–165.
8. *Gani A., Naruse J.* Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass // Renewable energy. 2007. Vol. 32. No. 4. Pp. 694–661. DOI: 10.1016/j.renene.2006.02.017
9. *Фильков А.И.* Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров. Томск : Издательский дом Томского государственного университета, 2014. С. 15–207. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000507638>
10. *Гришин А.М.* Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1. С. 41–49.
11. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Горение древесины и ее пожароопасные свойства. М. : Академия ГПС СЧ России. 2010, С. 1–160.



12. *Алешина А.А., Глазкова С.В., Луговская Л.А.* Современные представления о строении целлюлоз (обзор) // Химия растительного сырья. 2001. № 1. С. 5–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9337129>
13. *Лиштван И.И., Капуцкий Ф.Н., Янута Ю.Г., Абрамец А.М., Навоша Ю.Ю.* Структура фракций гуминовых кислот торфа // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2005. № 2. С. 108–113. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29021742>
14. *Гюльмалиев А.М., Гагарин С.Г., Головин Г.С.* Структура и свойства органической массы горючих ископаемых // Химия твердого топлива. 2004. № 6. С. 10–31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17709959>
15. *Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E., Simeoni A., Filkov A.I.* Energetic potential and kinetic behavior of peats // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2014. Vol. 117. No. 3. Pp. 1497–1508. DOI: 10.1007/s10973-014-3912-2
16. *Касымов Д.П.* Экспериментальное исследование заглупления фронта горения в слой торфа различного ботанического состава // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 1. С. 241–246.
17. *Лоскутов С.Р., Шапченко О.А., Анискина А.А.* Термический анализ древесины основных лесобразующих пород средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2015. № 6. С. 17–30. DOI: 10.15372/SJFS20150602
18. *Antal M.J.Jr., Varhegyi G.* Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge // Industrial & Engineering Chemistry Research. 1995. Vol. 34. No. 3. Pp. 703–717. DOI: 10.1021/ie00042a001
19. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 2. С. 19–32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17326710>
20. *Тарновская Л.И.* Изменения химического состава гуминовых кислот в процессе термолиза торфа // Химия твердого топлива. 1994. № 4–5. С. 33–39.
21. *Чухарева Н.В., Маслов С.Г.* Адсорбционные свойства термически модифицированного торфа и полученных на его основе активных углей // Химия растительного сырья. 2011. № 1. С. 169–174. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15859232>
22. *Лиштван И.И., Король Н.Т.* Основные свойства торфа и методы их определения. Минск : Наука и техника, 1985. 168 с.
23. *Freitas J.C., Banagamba T.J., Emmerich F.G.* <sup>13</sup>C high-resolution solid-state NMR study of peat carbonization // Energy Fuels. 1999. Vol. 13. No. 1. Pp. 53–59. DOI: 10.1021/ef980075c
24. *Мазалов Ю.А., Мелешко В.Ю., Павловец Г.Я.* Моделирование и основы регулирования процесса горения гетерогенных конденсированных систем. М. : Военная академия РВСН им. П. Великого, 2001. 291 с.
25. *Бобков С.А., Бабурин А.В., Комраков П.В.* Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. 174 с. URL: <https://academygps.ru/upload/iblock/a9a/a9a75968da58abd69a9d9578481b96f6.pdf>
26. *Хорошавин Л.Б., Медведев О.А., Беляков В.А., Михеева Е.В., Рудков В.С., Байтимирова Е.А.* Торф: возгорание торфа, тушение торфяников и торфокомпозиты. М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. С. 74–172. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19421097>
27. *Абдурагимов И.М.* Проблема тушения крупных лесных пожаров и крупномасштабных пожаров твердых горючих материалов в зданиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 2. С. 69–74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829847>
28. *Weil E.D.* Fire-protective and flame-retardant coatings — a state-of-the-art review // Journal of Fire Sciences. 2011. Vol. 2. No. 3. Pp. 259–296. DOI: 10.1177/0734904110395469
29. *Асеева Р.М., Заиков Г.Е.* Горение полимерных материалов. М. : Наука, 1981. 280 с.
30. *Liodakis S., Tsapara V., Agiovlasis I.P., Vorisis D.* Thermal analysis of Pinus sylvestris L. wood samples treated with a new gel–mineral mixture of short- and long-term fire retardants // Thermochimica Acta. 2013. Vol. 568. Pp. 156–160. DOI: 10.1016/j.tca.2013.06.011
31. *Тарахно А.В., Шаршанов А.Я.* Физико-химические основы использования воды в пожарном деле. Харьков : Акад. гражд. защиты Украины, 2004. 252 с.
32. *Liping Li, Hongdan Hu, Haiqing Hu.* Effect of ammonium polyphosphate modified with 3-(methylacryloxy) propyltrimethoxy silane on the flammability and thermal degradation of pine-needles // Polymers and Polymer Composites. 2014. Vol. 22. No. 9. Pp. 837–842. DOI: 10.1177/096739111402200911

33. Лобанов Ф.И. Использование полимерных материалов в пожаротушении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2004. № 1. С. 64–68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17868664>
34. Дауэнгауэр С.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2004. № 6. С. 78–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fire-extinguishing-with-fine-dispersed-water-mechanism-characteristics-perspectives>
35. Брушлинский Н.Н., Мешалкин Е.А., Усманов М.Х., Семенов В.П., Соловьев Д.В., Стецюк В.Ф. и др. Оценка эффективности тушения пожаров твердых горючих материалов и веществ на открытом пространстве при использовании огнезащитных устройств // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2003. № 3. С. 42–46. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-tusheniya-pozharov-tverdyh-goryuchih-materialov-i-veschestv-na-otkrytom-prostranstve-pri-ispolzovanii>
36. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Роль химических и термических факторов при гетерогенном ингибировании различных пламен // ДАН СССР. 1987. Т. 293. № 4. С. 892–895.
37. Антонов Д.В., Войтков И.С., Волков Р.С., Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Хасанов И.Р. и др. Влияние специализированных добавок на эффективность локализации пламенного горения и термического разложения лесных горючих материалов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 9. С. 5–16. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.5-16
38. Liodakis S., Antonopoulos I., Tsapara V. Forest fire retardancy evaluation of carbonate minerals using DTG and LOI // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2009. Vol. 96. Pp. 203–209. DOI: 10.1007/s10973-008-9378-3
39. Абдурегимов И.М., Куприн Г.Н., Куприн Д.С. Быстротвердеющие пены — новая эра в борьбе с лесными пожарами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 2. С. 7–13. DOI: 10.25257/FE.2016.2.7-13
40. Киреев А.А., Тарасова Г.В., Жерноклев К.В. Исследование массовой скорости выгорания древесины, огнезащищенной гелеобразующей системой  $MgCl_2 \cdot Na_2O \cdot 2,7 SiO_2$  // Вестник национального технического университета ХПИ. 2006. № 43. С. 65–70.
41. Vinogradov A.V., Kuprin D.S., Abduragimov I.M., Kuprin G.N., Serebriyakov E., Vinogradov V.V. Silica foams for fire prevention and firefighting // Applied Materials and Interfaces. 2016. Vol. 8. No. 1. Pp. 294–301. DOI: 10.1021/acsami.5b08653
42. Москвиллин Е.А., Родионов Е.С., Ерохин С.П., Волков И.В. Борьба с лесными пожарами путем создания заградительных полос методом нанесения быстро твердеющей пены // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2015. № 41. С. 62–64. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23366055>
43. Копылов Н.П., Москвиллин Е.А., Федоткин Д.Н., Стрижак П.А. Влияние вязкости огнетушащего раствора на эффективность тушения лесных пожаров с помощью авиации // Лесотехнический журнал. 2016. № 4. С. 62–66. DOI: 10.12737/23436
44. Ивченко О.А., Панкин К.Е. Тушение лесных горючих материалов гидрогелями на основе гидроксида алюминия // Лесотехнический журнал. 2019. № 1. С. 76–84. DOI: 10.12737/article\_5c92016e1314b2.49705560
45. Крупкин В.Г., Мохин Г.Н., Халтуринский Н.А. Моделирование образования многослойной структуры огнезащитными вспучивающимися составами при воздействии пожара // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 8. С. 202–206. URL: <http://old.izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=3587>
46. Гаращенко А.Н., Берлин А.А., Кульков А.А. Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 2. С. 9–30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30
47. Lewin M. Unsolved problems and unanswered questions in flame retardance of polymers // Polymer Degradation and Stability. 2005. Vol. 88. Issue 1. Pp. 13–19. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2003.12.011
48. Корольченко А.Я., Гаращенко А.Н., Гаращенко Н.А., Рудзинский В.П. Расчеты толщин огнезащиты, обеспечивающих требуемые показатели пожарной опасности деревоклееных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2008. Т. 17. № 3. С. 49–56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12510629>
49. Гусев В.Г., Арцыбашев Е.С. Исследования Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства в области охраны лесов от пожаров // Труды Санкт-П

- тербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2014. № 2. С. 56–73. URL: <http://journal.spb-niil.ru/pdf/2-2014-full/spbniilh-proceedings-2-2014-7.pdf>
50. Богданова В.В., Кобец О.И. Синтез и физико-химические свойства фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония (Обзор) // Журнал прикладной химии. 2014. Т. 87. Вып. 10. С. 1385–1399. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43059371>
  51. Анунов Е.В., Радивилов С.М. Снижение горючести деревянных конструкций пропиточными составами // Горение и плазмохимия. 2011. Т. 9. № 1. С. 43–50. URL: <http://cpc.icp.kz/index.php/cpc/article/view/232>
  52. Демчина Р.А., Грынькив А.С., Федина М.Ф., Бэхта П.А. Новый антипирен для древесины на основе конденсированных соединений фосфора, азота и бора // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2013. Вып. 37. С. 155–160. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21267736>
  53. Леонович А.А., Шеломов А.В. Сравнительный анализ эффективности огнезащитных средств на примере древесных материалов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013. Вып. 204. С. 161–171. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21394469>
  54. Гуцев Н.Д., Михайлова Н.В. Разработка методик лабораторных исследований огнетушащих растворов // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2015. № 2. С. 55–70. URL: <http://journal.spb-niil.ru/pdf/2-2015/spbniilh-proceedings-2-2015-5-full.pdf>
  55. Laurichesse S., Avérous L. Chemical modification of lignins: towards biobased polymers // Progress in Polymer Science. 2014. Vol. 39. No. 7. Pp. 1266–1290. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.11.004
  56. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1981. 272 с.
  57. Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б., Тодес О.М., Франк-Каменецкий Д.А., Кондратьев В.Н., Загулин А.В. Теория горения и взрыва / отв. ред. Ю.В. Фролов. М.: Наука, 1981. 411 с.
  58. Портнов Ф.А. Влияние модификаторов на характеристики пенококса, образующегося при термическом разложении древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 4. С. 24–30. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.04.24-31
  59. Guo C., Wang S., Wang Q. Synergistic effect of treatment with disodium octaborate tetrahydrate and guanil urea phosphate on flammability of pine wood // European Journal of Wood and Wood Products. 2018. Vol. 76. No. 5. Pp. 213–220. DOI: 10.1007/s00107-017-1171-1
  60. Tsapko Y., Tsapko A. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3. No. 10 (87). Pp. 50–55. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102393
  61. Степина И.В., Котлярова И.А., Мясоедов Е.М., Сидоров В.И. Термодеструкция в атмосфере азота древесины сосны, модифицированной боразотными соединениями // Химия растительного сырья. 2013. № 3. С. 83–90. DOI: 10.14258/jcprm.1303083
  62. Анохин Е.А., Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б. Применение огнезащитных пропиточных композиций для снижения пожарной опасности деревянных конструкций с различными сроками эксплуатации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 2. С. 22–35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.22-35
  63. Carosio F., Kochumalayil J., Cuttca F., Camino G., Berglund L. Oriented clay nanopaper from biobased components—mechanisms for superior fire protection properties // ACS Applied Materials & Interfaces. 2016. Vol. 7. No. 10. Pp. 5847–5856. DOI: 10.1021/am509058h
  64. Pappa A., Mikedi K., Tzamtzis N., Statheropoulos M. TG-MS analysis for studying the effects of fire retardants on the pyrolysis of pine-needles and their components // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2006. Vol. 84. Pp. 655–661. DOI: 10.1007/s10973-005-7201-y
  65. Alongi J., Ciobanu M., Malucelli G. Novel flame retardant finishing systems for cotton fabrics based on phosphorus-containing compounds and silica derived from sol-gel // Carbohydrate Polymers. 2011. Vol. 85. No. 3. Pp. 599–608. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.03.024
  66. Покровская Е.Н., Кобелев А.А., Нагановский Ю.К. Механизм и эффективность огнезащиты фосфоркремнийорганических систем для древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2009. Т. 18. № 3. С. 44–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12772426>
  67. Agueda A., Pastor E., Perez Y., Viegas D.X., Planas E. Fire intensity reduction in straw fuel beds treated with a long-term retardant // Fire Safety Journal. 2011. Vol. 46. No. 1–2. Pp. 41–47. DOI: 10.1016/j.firesaf.2010.11.003

68. *Baysal E., Altinak M., Colak M., Ozaki S., Toker H.* Fire resistance of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) treated with borates and natural extractives // *Bioresource Technology*. 2007. Vol. 98. No. 5. Pp. 1101–1105. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.04.023
69. *Раковский В.Е., Пигулевская Л.В.* Химия и генезис торфа / под ред. А.В. Лазарева. М. : Недра, 1978. 231 с.
70. *Чулюков М.А., Чайков В.И.* Торфяные пожары и меры борьбы с ними. М. : Наука, 1969. 113 с.
71. *Никитин Ю.А., Рубцов В.Ф.* Предупреждение и тушение пожаров в лесах и на торфяниках. М. : Россельхозиздат, 1986. 95 с.
72. *Усень В.В.* Лесные пожары, последствия и борьба с ними. Гомель : ИЛ НАНРБ, 2002. 205 с.
73. *Фалюшин П.А.* О механизме распространения очага горения в торфе // *Природопользование*. 2011. Вып. 19. С. 204–206. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42457628>
74. *Filkov A.I., Kuzin A.Ya., Sharypov O.V., Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E. et al.* Comparative study to evaluate the drying kinetics of boreal peats from micro to macro scales // *Energy Fuels*. 2012. Vol. 26. No. 1. Pp. 349–356. DOI: 10.1021/ef201221y
75. *Субботин А.Н.* Распространение торфяного пожара при разных условиях теплообмена с внешней средой // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2007. Т. 16. № 5. С. 42–49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513104>
76. *Вонский С.М., Наумов В.Б., Жданко В.А.* Лесные пожары и способы их тушения. Л. : Ленинградский, 1989. 56 с.
77. *Лештван И.И.* Выбор ПАВ для улучшения смачиваемости высушенного торфа // *Коллоидный журнал*. 1984. Т. 46. № 1. С. 29–36.
78. *Кустов М.В., Калугин В.Д.* Проблемы повышения огнетушащей способности растворяемых систем на основе воды // *Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. Междунар. науч.-практ. конф.* Ч. 1. М., 2008. С. 188–190.
79. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Увеличение эффективности огнезащитных составов для древесины путем регулирования химических реакций в конденсированной фазе // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. 2008. Т. 7. № 1. С. 50–57. URL: <https://journals.ucp.by/index.php/vic/article/view/276>
80. *Ломакин С.М., Заиков Г.Е., Микитаев А.К., Кочнев А.М., Стоянов О.В., Шкодич В.Ф., Наумов С.В.* Замедлители горения для полимеров // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15. Вып. 7. С. 71–86. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17680920>
81. *Dasari A., Zhong-Zhen Yu, Gui-Peng Cai, Yiu-Wing Mai.* Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials // *Progress in Polymer Science*. 2013. Vol. 38. No. 9. Pp. 1357–1387. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.06.006
82. *Aksit A., Onar N., Kutlu B., Sergin E., Yakin I.* Synergistic effect of phosphorus, nitrogen and silicon on flame retardancy properties of cotton fabric treated by sol-gel process // *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2016. Vol. 28. No. 3. Pp. 319–327. DOI: 10.1108/IJCT-03-2016-0029
83. *Laoutid F., Bonnaud L., Alexandre M., Lopez-Cuesta J.-M., Dubois Ph.* New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009. Vol. 63. No. 3. Pp. 100–125. DOI: 10.1016/j.mser.2008.09.002
84. *Lowden L.A., Hull T.R.* Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // *Fire Science Reviews*. 2013. Vol. 2. No. 4. Pp. 1–19. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
85. *Xinyan Huang, Rein G.* Smouldering combustion of peat in wildfires: Inverse modelling of the drying and the thermal and oxidative decomposition kinetics // *Combustion and Flame*. 2014. Vol. 161. No. 6. Pp. 1633–1644. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.12.013
86. *Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X.* Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment // *Fuel*. 2009. Vol. 88. No. 6. Pp. 1024–1030. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.10.034
87. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Регулирование физико-химических свойств композиций на основе фосфатов металлов-аммония, проявляющих огнезащитный и огнетушащий эффект // *Свиридовские чтения : сб. ст. / отв. ред. Т.Н. Воробьева*. Вып. 7. Минск, 2011. С. 21–27. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/24996>
88. *Богданова В.В., Кобец О.И.* Исследование огнезащитной эффективности составов на основе аммонийных фосфатов двух- и трехвалентных металлов в зависимости от условий получения // *Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География*. 2009. Вып. 1. С. 34–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22574185>



89. Сычев М.М. Перспектива использования золь-гель метода в технологии неорганических материалов // Журнал прикладной химии. 1990. Т. 63. № 3. С. 489–499.
90. Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А. Огнезадерживающие свойства металлофосфатных суспензий на основе природного сырья // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии : сб. науч. тр. Минск : Бел. навука, 2011. С. 272–284.
91. Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А. Разработка синтетического состава комплексного действия для огнезащиты и тушения природных горючих материалов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2012. № 1 (31). С. 53–61. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26295113>
92. Богданова В.В., Кобец О.И. Синтез замедлителей горения для древесины и торфа на основе природных минералов и их физико-химические свойства // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск: Полимерные материалы пониженной горючести. 2013. № 8 (145). С. 232–236. URL: <http://old.izv-tv.tti.sfedu.ru/?p=3617>
93. Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А. Исследование огнезащитных и огнетушащих свойств суспензий ортофосфатов, полученных на основе природных минералов // Свиридовские чтения : сб. ст. Вып. 9. Минск, 2013. С. 28–36. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/228358>
94. Богданова В.В., Лахвич В.В., Врублевский А.В., Дмитриченко А.С. Огнетушащая эффективность жидкостных химических составов при тушении пожаров класса А распылительными устройствами пожаротушения // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2008. № 1 (7). С. 35–41. URL: <https://vestnik.ucp.by/ru/archive>
95. Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А. Экономичные огнезащитно-огнетушащие суспензии на основе природного металлосиликатного сырья // Инновации в науке, промышленности и образовании : сб. мат. науч.-техн. конф. Витебск, 2010. С. 140–144.
96. Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А. Температурный профиль в модельных очагах торфа при его тушении синтетическими жидкостными составами // XXIV Международная научно-практическая конференция по проблемам пожарной безопасности, посвященная 75-летию создания института : сб. В 2-х ч. Ч. 2. М. : ВНИИПО, 2012. С. 71–74.
97. Людко А.А., Богданова В.В., Кобец О.И. Методика определения растекаемости расплавов огнетушащих химических составов // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : мат. междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 24–25 мая 2012 г. В 2-х ч. Ч. 1. Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012. С. 190–191.
98. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
99. Марченко З. Фотометрическое определение элементов / пер. с пол. И.В. Матвеевой и А.А. Немодрука ; под ред. Ю.А. Золотова. М. : Мир, 1971. 502 с.
100. Богданова В.В., Кобец О.И., Усень В.В., Матюха С.Л., Гордей Н.В. Разработка и огнезащитно-огнетушащая эффективность нового унифицированного состава на основе местного сырья для борьбы с пожарами в лесном комплексе // Труды БГТУ. № 1: Лесное хозяйство. 2014. № 1. С. 55–58. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/11427>
101. Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А. Исследование физико-химических и огнепреграждающих свойств синтетических суспензий на основе трепела и бентонита // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии : сб. тез. XXVII Междунар. науч.-техн. конф. Минск : Бел. навука, 2013. С. 151–160.
102. Богданова В.В., Кобец О.И., Кирлица В.П. Механизм и синергическое действие азот-фосфорсодержащих антипиренов при огнезащите и тушении древесины и торфа // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 4. С. 57–63. DOI: 10.7868/S0207401X16040038
103. Богданова В.В., Кобец О.И., Буряя О.Н. Направленное регулирование огнезащитной и огнетушащей эффективности N-P-содержащих антипиренов в синтетических и природных полимерах // Горение и взрыв. 2019. Т. 12. № 2. С. 106–115. DOI: 10.30826/CE19120214
104. Богданова В.В., Кобец О.И., Людко А.А., Кирлица В.П. Оптимизация огнезащитно-огнетушащих свойств состава для предотвращения и локализации пожаров в природном комплексе методом математического планирования эксперимента // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2012. № 1 (15). С. 32–39. URL: <https://vestnik.ucp.by/ru/archive>
105. Богданова В.В., Кобец О.И., Кирлица В.П. Применение полного факторного эксперимента для определения механизма ингибирующего действия огнепреграждающих средств // Свиридовские чтения : сб. ст. Вып. 10. Минск, 2014. С. 23–38. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/106529>

106. Богданова В.В., Кобец О.И. Атмосферостойкий огнезащитно-огнетушащий состав для предотвращения и тушения пожаров в природном комплексе // Свиридовские чтения : сб. ст. Вып. 13. Минск, 2017. С. 31–40. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/228556>
107. Богданова В.В., Кобец О.И. Ресурсосберегающий огнезащитно-огнетушащий состав «Комплексил» для предотвращения и тушения пожаров в природном комплексе // Альтернативные источники сырья и топлива : сб. науч. тр. Вып. 3. Минск : Бел. наука, 2018. С. 91–100.
108. Богданова В.В., Кобец О.И., Усень В.В., Гордей Н.В., Матюха С.Л. Исследование физико-химических и огнепреграждающих свойств синтетических составов по отношению к древесине и торфу // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. Вып. 74. Гомель : ИЛ НАН Б, 2014. С. 491–501.
109. Усень В.В., Гордей Н.В., Маркевич Т.С., Тегленков Е.А. Лесоводственно-экологические аспекты применения химического состава «Комплексил» для борьбы с пожарами в природном комплексе Республики Беларусь // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. Вып. 76. Гомель : ИЛ НАН Беларуси, 2016. С. 543–552.

## REFERENCES

1. Gutsev N.D., Mikhailova N.V., Korchunova I.Yu. The results of field tests of new fire extinguishing compositions. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2013; 4:40-52. URL: <http://journal.spb-niil.ru/pdf/4-2013/spbniilh-proceedings-4-2013-4.pdf> (rus).
2. Abduragimov I.M. Once again about the state problem of extinguishing of large forest fires (in Russia and all over the world). *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(2):5-10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829837> (rus).
3. Abduragimov I.M. Forest fire can't be destroyed by bombing. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(2):64-68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829846> (rus).
4. Popescu C.M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products — An overview. *Fire and Materials*. 2020; 44(1):100-111. DOI: 10.1002/fam.277
5. Vakhitova L.N. Fire retardant nanocoating for wood protection. *Nanotechnology in Eco-efficient Construction*. 2nd ed. Elsevier, 2019; 361-391. DOI: 10.1016/b978-0-08-102641-0.00016-5
6. Grishin A.M., Yakimov A.S. Mathematical modelling of thermophysical processes at peat firing and smoldering. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2010; 17(1):137-153. DOI: 10.1134/S0869864310010166
7. Subbotin A.N. Special features of propagation of peat fire. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2003; 76(5):1145-1153. DOI: 10.1023/B:JOEP.0000003233.96639.f
8. Gani A., Naruse J. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. *Renewable energy*. 2007; 32(4):694-661. DOI: 10.1016/j.renene.2006.02.017
9. Filkov A.I. *Physical and mathematical modeling of the occurrence of natural fires*. Tomsk, Tomsk State University Publishing House, 2014; 15-207. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000507638> (rus).
10. Grishin A.M. General mathematical models of forest and peat fires and their applications. *Mechanical successes*. 2002; 1:41-49. (rus).
11. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Combustion of wood and its fire hazard properties*. Moscow, Academy of State Fire Service of the MF Russia, 2010; 1-160. (rus).
12. Aleshina A.A., Glazkova S.V., Lugovskaya L.A. Modern ideas about the structure of cellulose (review). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya/Chemistry of vegetable raw materials*. 2001; 1:5-36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9337129> (rus).
13. Lishtvan I.I., Kaputsky F.N., Yanuta Yu.G., Abramets A.M., Navosha Yu.Yu. The structure of peat humic acid fractions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*. 2005; 2:108-113. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29021742> (rus).
14. Gyulmaliev A.M., Gagarin S.G., Golovin G.S. The structure and properties of the organic matter of fossil fuels. *Solid Fuel Chemistry*. 2004; 38(6):1-22.
15. Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E., Simeoni A., Filkov A.I. Energetic potential and kinetic behavior of peats. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2014; 117(3):1497-1508. DOI: 10.1007/s10973-014-3912-2
16. Kasymov D.P. Experimental investigation of the deepening of the combustion front into peat layers different in botanical composition. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017; 90(1):241-246. DOI: 10.1007/s10891-017-1559-0

17. Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. Thermal analysis of wood of the main tree species of central Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Siberian Journal of Forest Science)*. 2015; 6:17-30. DOI: 10.15372/SJFS20150602 (rus).
18. Antal M.J.Jr., Varhegyi G. Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1995; 34(3):703-717. DOI: 10.1021/ie00042a001
19. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Combustion and fire hazard of wood. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(2):19-32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17326710> (rus).
20. Tarnovskaya L.I. Changes in the chemical composition of humic acids in the process of peat thermolysis. *Solid Fuel Chemistry*. 1994; 4-5:33-39. (rus).
21. Chukhareva N.V., Maslov S.G. Adsorption properties of thermally modified peat and activated carbons obtained on its basis. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja/Chemistry of vegetable raw materials*. 2011; 1:169-174. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15859232> (rus).
22. Lishtvan I.I., Korol' N.T. *The main properties of peat and methods for their determination*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1985; 168. (rus).
23. Freitas J.C., Banagamba T.J., Emmerich F.G. <sup>13</sup>C high-resolution solid-state NMR study of peat carbonization. *Energy Fuels*. 1999; 13(1):53-59. DOI: 10.1021/ef980075c
24. Mazalov Yu.A., Meleshko V.Yu., Pavlovets G.Ya. Modeling and basics of regulation of the combustion process of heterogeneous condensed systems. Moscow, Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great, 2001; 291. (rus).
25. Bobkov S.A., Baburin A.V., Komrakov P.V. *Physicochemical bases of development and extinguishing of fires*. Moscow, Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia, 2014; 174. URL: <https://academygps.ru/upload/iblock/a9a/a9a75968da58abd69a9d9578481b96f6.pdf> (rus).
26. Khoroshavin L.B., Medvedev O.A., Belyakov V.A., Mikheeva E.V., Rudkov V.S., Baitimirova E.A. *Peat: peat fire, peat extinguishing and peat composites*. Moscow, FGBU VNII GOChS (FC), 2013; 74-172. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19421097> (rus).
27. Abduragimov I.M. The problem of extinguishing large forest fires and large-scale fires of solid combustible materials in buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(2):69-74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17829847> (rus).
28. Weil E.D. Fire-protective and flame-retardant coatings — A state-of-the-art review. *Journal of Fire Sciences*. 2011; 2(3):259-296. DOI: 10.1177/0734904110395469
29. Aseeva R.M., Zaikov G.E. *Combustion of polymeric materials*. Moscow, Nauka Publ., 1981; 280. (rus).
30. Liodakis S., Tsapara V., Agiovlasis I.P., Vorisis D. Thermal analysis of Pinus sylvestris L. wood samples treated with a new gel-mineral mixture of short- and long-term fire retardants. *Thermochimica Acta*. 2013; 568:156-160. DOI: 10.1016/j.tca.2013.06.011
31. Tarakhno A.V., Sharshanov A.Ya. *Physicochemical bases of water use in fire fighting*. Kharkov, Acad. citizen protection of Ukraine, 2004; 252. (rus).
32. Liping Li, Hongdan Hu, Haiqing Hu. Effect of ammonium polyphosphate modified with 3-(methylacryloyl) propyltrimethoxy silane on the flammability and thermal degradation of pine-needles. *Polymers and Polymer Composites*. 2014; 22(9):837-842. DOI: 10.1177/096739111402200911
33. Lobanov F.I. Utilization of polymer materials in fire extinguishing process Lobanov. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2004; 1:64-69. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17868664> (rus).
34. Dauengauer S.A. Fire extinguishing with fine-dispersed water: mechanism, characteristics, perspectives. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2004; 6:78-81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fire-extinguishing-with-fine-dispersed-water-mechanism-characteristics-perspectives> (rus).
35. Brushlinsky N.N., Meshalkin E.A., Usmanov M.Kh., Semenov V.P., Solov'ev D.V., Stetsyuk V.F. et al. Evaluation of the effectiveness of extinguishing fires of solid combustible materials and substances in an open space using fire protection devices. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2003; 3:42-46. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-tusheniya-pozharov-tverdyh-goryuchih-materialov-i-veschestv-na-otkrytom-prostranstve-pri-ispolzovanii> (rus).
36. Baratov A.N., Ivanov E.N. The role of chemical and thermal factors in heterogeneous inhibition of various flames. *DAN SSSR / Reports AS SU*. 1987; 293(4):892-895. (rus).
37. Antonov D.V., Voitkov I.S., Volkov R.S., Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Khasanov I.R. et al. Influence of specialized additives on the efficiency of localization of flame burning and thermal decomposition of forest fuel materials. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(9):5-15. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.5-16 (rus).
38. Liodakis S., Antonopoulos I., Tsapara V. Forest fire retardancy evaluation of carbonate minerals using DTG and LOI. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2009; 96:203-209. DOI: 10.1007/s10973-008-9378-3

39. Abduragimov I.M., Kuprin G.N., Kuprin D.S. Fast-hardening foams — a new era in fighting forest fires. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2016; 2:7-13. DOI: 10.25257/FE.2016.2.7-13 (rus).
40. Kireev A.A., Tarasova G.V., Zhernoklev K.V. Investigation of the mass burning rate of wood with a fire-resistant gel-forming system  $\text{MgCl}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot 2.7 \text{ SiO}_2$ . *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: "Informatics and Modeling"*. 2006; 43:65-70. (rus).
41. Vinogradov A.V., Kuprin D.S., Abduragimov I.M., Kuprin G.N., Serebriyakov E., Vinogradov V.V. Silica foams for fire prevention and firefighting. *Applied Materials and Interfaces*. 2016; 8(1):294-301. DOI: 10.1021/acsami.5b08653
42. Moskvilin E.A., Rodionov E.S., Erokhin S.P., Volkov I.V. Fight against forest fires by creation of protecting strips by method of putting quickly hardening foam. *Actual problems of the forest complex*. 2015; 41:62-64. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23366055> (rus).
43. Kopylov N.P., Moskvilin E.A., Fedotkin D.N., Strizhak P.A. Influence of viscosity of fire-extinguishing solution on forest fires efficiency extinguish using aviation. *Forestry Engineering Journal*. 2016; 4:62-66. DOI: 10.12737/23436 (rus).
44. Ivchenko O.A., Pankin K.E. Extinguishing forest flammable materials with hydrogels based on aluminum hydroxide. *Forestry Engineering Journal*. 2019; 1:76-84. DOI: 10.12737/article\_5c92016e1314b2.49705560 (rus).
45. Krupkin V.G., Mokhin G.N., Khalturinsky N.A. Modeling of the formation of multilayered structure by fire-retardant intumescent coatings under the influence of a fire. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2013; 8:202-206. URL: <http://old.izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=3587> (rus).
46. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kulkov A.A. Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(2):9-30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30 (rus).
47. Lewin M. Unsolved problems and unanswered questions in flame retardance of polymers. *Polymer Degradation and Stability*. 2005; 88(1):13-19. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2003.12.011
48. Korolchenko A.Ya., Garashchenko A.N., Garashchenko N.A., Rudzinsky V.P. Calculations of the thickness of fire protection, providing the required indicators of fire hazard of wood-glued structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 17(3):49-56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12510629> (rus).
49. Gusev V.G., Arzybashev E.S. Researches Saint-Petersburg Forestry Research Institute in the field of protection of forests from fires. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2014; 2:56-73. URL: <http://journal.spb-niil.ru/pdf/2-2014-full/spbniilh-proceedings-2-2014-7.pdf> (rus).
50. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Synthesis and physicochemical properties of di- and trivalent metal-ammonium phosphates. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2014; 87(10):1385-1399. DOI: 10.1134/S1070427214100012
51. Antsupov E.V., Radivilov S.M. Combustibility degradation of wooden construction members with impregnating compounds. *Combustion and Plasma Chemistry*. 2011; 9(1):43-50. URL: <http://cpc.icp.kz/index.php/cpc/article/view/232> (rus).
52. Demchina R.A., Grynjkiv A.S., Fedyna M.F., Behta P.A. New flame retardant for a wood based on the condensed compounds of phosphorous, nitrogen and boron. *Actual problems of the forest complex*. 2013; 37:155-160. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21267736> (rus).
53. Leonovich A.A., Sheloumov A.V. The comparative analysis of flameretardant means effectiveness on example of the wood materials. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. 2013; 204:161-171. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21394469> (rus).
54. Gutsev N.D., Mihailova N.V. Development of methods of laboratory research of fire extinguishing water solutions. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2015; 2:55-70. URL: <http://journal.spb-niil.ru/pdf/2-2015/spbniilh-proceedings-2-2015-5-full.pdf> (rus).
55. Laurichesse S., Averous L. Chemical modification of lignins: towards biobased polymers. *Progress in Polymer Science*. 2014; 39(7):1266-1290. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.11.004
56. Demidov P.G., Shandyba V.A., Shcheglov P.P. *Combustion and properties of combustible substances*. 2nd ed., rev. Moscow, Khimiya Publ., 1981; 272. (rus).
57. Zeldovich Ya.B., Khariton Yu.B., Todes O.M., Frank-Kamenetskiy D.A., Kondrat'ev V.N., Zagulin A.V. *Combustion and explosion theory* / Yu.V. Frolov (executive ed). Moscow, Nauka Publ., 1981; 258. (rus).
58. Portnov F.A. Influence of modifiers on coked foam structure and properties formed with thermal decomposition of wood. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(4):24-30. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.04.24-31 (rus).



59. Guo C., Wang S., Wang Q. Synergistic effect of treatment with disodium octaborate tetrahydrate and guanidyl urea phosphate on flammability of pine wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2018; 76(5):213-220. DOI: 10.1007/s00107-017-1171-1
60. Tsapko Y., Tsapko A. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 3:10(87):50-55. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102393
61. Stepina I.V., Kotliarova I.A., Miasoedov E.M., Sidorov V.I. Thermal destruction in a nitrogen atmosphere pine wood modified boron-nitrogen compounds. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja/Chemistry of vegetable raw materials*. 2013; 3:83-90. DOI: 10.14258/jcprm.1303083 (rus).
62. Anokhin E.A., Polishchuk E.Yu., Sivenkov A.B. Use of fire-retardant impregnating compositions for reducing fire hazard of wooden structures of various lifetimes. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(2):22-35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.22-35 (rus).
63. Carosio F., Kochumalayil J., Cuttca F., Camino G., Berglund L. Oriented clay nanopaper from biobased components-mechanisms for superior fire protection properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016; 7(10):5847-5856. DOI: 10.1021/am509058h
64. Pappa A., Mikić K., Tzamtzis N., Statheropoulos M. TG-MS analysis for studying the effects of fire retardants on the pyrolysis of pine-needles and their components. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2006; 84: 655-661. DOI: 10.1007/s10973-005-7201-y
65. Alongi J., Ciobanu M., Malucelli G. Novel flame retardant finishing systems for cotton fabrics based on phosphorus-containing compounds and silica derived from sol-gel. *Carbohydrate Polymers*. 2011; 85(3):599-608. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.03.024
66. Pokrovskaya E.N., Kobelev A.A., Naganovsky Yu.K. Mechanism and efficiency of fire protection of organophosphorus systems for wood. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2009; 18(3):44-48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12772426> (rus).
67. Agueda A., Pastor E., Perez Y., Viegas D.X., Planas E. Fire intensity reduction in straw fuel beds treated with a long-term retardant. *Fire Safety Journal*. 2011; 46(1-2):41-47. DOI: 10.1016/j.firesaf.2010.11.003
68. Baysal E., Altinak M., Colak M., Ozaki S., Toker H. Fire resistance of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) treated with borates and natural extractives. *Bioresource Technology*. 2007; 98:1101-1105. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.04.023
69. Rakovsky V.E., Pigulevskaya L.V. *Chemistry and genesis of peat* / A.V. Lazareva (ed.). Moscow, Nedra Publ., 1978; 231. (rus).
70. Chulyukov M.A., Chaikov V.I. *Peat fires and measures to combat them*. Moscow, Nauka Publ., 1969; 113. (rus).
71. Nikitin Yu.A., Rubtsov V.F. *Prevention and suppression of fires in forests and peat bogs*. Moscow, Rossel'hozizdat Publ., 1986; 95. (rus).
72. Usenya V.V. *Forest fires, consequences and fight against them*. Gomel, Forest Institute NASRB, 2002; 202. (rus).
73. Falushin P.A. On the mechanism of burning centre distribution in peat. *Nature management*. 2011; 19:204-206. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42457628> (rus).
74. Filkov A.I., Kuzin A.Ya., Sharypov O.V., Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E. et al. Comparative study to evaluate the drying kinetics of boreal peats from micro to macro scales. *Energy Fuels*. 2012; 26(1):349-356. DOI: 10.1021/ef201221y
75. Subbotin A.N. Propagation of a peat fire under various conditions of heat and mass transfer with the external environment. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2007; 16(5):42-49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513104> (rus).
76. Vonsky S.M., Naumov V.B., Zhdanko V.A. *Forest fires and methods of extinguishing them*. Leningrad, Leningrad Research Institute of Wood Chemistry, 1989; 56. (rus).
77. Lishtvan I.I. The choice of surfactants to improve the wettability of dried peat. *Colloid Journal*. 1984; 46(1):29-36. (rus).
78. Kustov M.V., Kalugin V.D. Problems of increasing the fire extinguishing capacity of water-based mortar systems. *Actual problems of fire safety : materials of the International Scientific and Practical Conference*. Part 1. Moscow, 2008; 188-190. (rus).
79. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Increasing the effectiveness of fire retardants for wood by regulating chemical reactions in the condensed phase. *Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*. 2008; 7(1):50-57. URL: <https://journals.ucp.by/index.php/vice/article/view/276> (rus).

80. Lomakin S.M., Zaikov G.E., Mikitaev A.K., Kochnev A.M., Stoyanov O.V., Shkodich V.F., Naumov S.V. Flame retardants for polymers. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012; 15(7):71-86. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17680920> (rus).
81. Dasari A., Zhong-Zhen Yu, Gui-Peng Cai, Yiu-Wing Mai. Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*. 2013; 38(9):1357-1387. DOI: 10.1016/j.prog-polymsci.2013.06.006
82. Aksit A., Onar N., Kutlu B., Sergin E., Yakin I. Synergistic effect of phosphorus, nitrogen and silicon on flame retardancy properties of cotton fabric treated by sol-gel process. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2016; 28(3):319-327. DOI: 10.1108/IJCST-03-2016-0029
83. Laoutid F., Bonnaud L., Alexandre M., Lopez-Cuesta J.-M., Dubois Ph. New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009; 63(3):100-125. DOI: 10.1016/j.mser.2008.09.002
84. Lowden L.A., Hull T.R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*. 2013; 2(4):1-19. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
85. Xinyan Huang, Rein G. Smouldering combustion of peat in wildfires: Inverse modelling of the drying and the thermal and oxidative decomposition kinetics. *Combustion and Flame*. 2014; 161(6):1633-1644. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.12.013
86. Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*. 2009; 88(6):1024-1030. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.10.034
87. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Regulation of the physicochemical properties of compositions based on metal-ammonium phosphates, exhibiting a fire-retardant and fire-extinguishing effect. *Sviridov readings : collection of articles / T.N. Vorob'eva (ed.)*. Vol. 7. Minsk, 2011; 21-27. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/24996> (rus).
88. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Synthesis, physicochemical and fire-retardant properties of ammonium metallophosphates. *Vestnik BGU. Series 2: Chemistry. Biology. Geography*. 2009; 1:34-39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22574185> (rus).
89. Sychev M.M. The prospect of using the sol-gel method in the technology of inorganic materials. *Journal of Applied Chemistry of the USSR*. 1990; 63(3):489-499.
90. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Fire-retardant properties of metal-phosphate suspensions based on natural raw materials. *Chemical reagents, reagents and low-tonnage processes chemistry : collection of scientific papers*. Minsk, Belarusian Science Publ., 2011; 272-284. (rus).
91. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Development of synthetic compositions of complex action for fire protection and extinguishing of natural combustible materials. *Emergencies: prevention, elimination*. 2012; 1(31):53-61. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26295113> (rus).
92. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Synthesis of flame retardants for wood and peat on the basis of natural minerals and their physico-chemical properties. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. Thematic issue "Polymer materials of low flammability"*. 2013; 8(145):232-236. URL: <http://old.izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=3617> (rus).
93. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Investigation of fire-retardant and fire-extinguishing properties of orthophosphate suspensions obtained on the basis of natural minerals. *Sviridov readings : collection of articles*. Vol. 9. Minsk, 2013; 28-36. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/228358> (rus).
94. Bogdanova V.V., Lakhvich V.V., Vrublevsky A.V., Dmitrichenko A.S. Fire extinguishing efficiency of liquid chemical compositions when extinguishing class A fires with spray fire extinguishing devices. *Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*. 2008; 1(7):35-41. URL: <https://vestnik.ucp.by/ru/archive> (rus).
95. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Economical fire-retardant and fire-extinguishing suspensions based on natural metallosilicate raw materials. *Innovations in science, industry and education : collection of materials of the scientific and technical conference*. Vitebsk, 2010; 140-144. (rus).
96. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Temperature profile in model foci of peat when it is quenched with synthetic liquid compositions. *XXIV International Scientific and Practical Conference on Fire Safety Problems Dedicated to the 75th Anniversary of the Institute : Collection*. In 2nd parts. Part 2. Moscow, VNIPO, 2012; 71-74. (rus).
97. Lyudko A.A., Bogdanova V.V., Kobets O.I. Methods for determining the spreadability of melts of fire-extinguishing chemical compositions. *Emergencies: theory, practice, innovations : materials of the international scientific-practical conference. Gomel, May 24-25, 2012*. In 2nd parts. Part 1. Gomel, GSTU im. BY. Sukhoi, 2012; 190-191. (rus).
98. Arinushkina E.V. *Manual for the chemical analysis of soils*. 2nd ed., rev. and add. Moscow, MSU, 1970; 487. (rus).

99. Marczenko Z. *Kolorymetryczne oznaczanie pierwiastkow*. Warszawa, 1968; 716. (pol.).
100. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Usenya V.V., Gordey N.V., Matyukha S.L. Development and fire retardant and fire extinguishing efficiency of a new unified composition based on local raw materials for fighting fires in the forestry complex. *Proceedings of BSTU. No. 1: Forestry*. 2014; 1:55-58. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/11427> (rus).
101. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A. Investigation of the physicochemical and fire-preventing properties of synthetic suspensions based on tripoli and bentonite. *Chemical reagents, reagents and processes of low-tonnage chemistry : collection of abstracts of the XXVII International scientific and technical conference*. Minsk, Belarusian Science Publ., 2013; 151-160. (rus).
102. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Kirlitsa V.P. Mechanism and synergistic action of nitrogen-phosphorus-containing fire retardants in fire protection and extinguishing of wood and peat. *Khimicheskaya fizika*. 2016; 35(4):57-63. DOI: 10.7868/S0207401X16040038 (rus).
103. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Buraya O.N. Directional regulation of the fire-protective and extinguish efficiency of N-P-containing fire retardants in synthetic and natural polymers. *Combustion and explosion*. 2019; 12(2):106-115. DOI: 10.30826/CE19120214 (rus).
104. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A., Kirlitsa V.P. Optimization of fire-retardant and fire-extinguishing properties of the composition for the prevention and localization of fires in the natural complex by the method of mathematical planning of the experiment. *Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*. 2012; 1(15):32-39. URL: <https://vestnik.ucp.by/ru/archive> (rus).
105. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Kirlitsa V.P. Application of a full factorial experiment to determine the mechanism of the inhibitory effect of flame retardants. *Sviridov readings : collection of articles*. Vol. 10. Minsk, 2014; 23-38. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/228358> (rus).
106. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Weatherproof fire-retardant and fire-extinguishing composition for preventing and extinguishing fires in the natural complex. *Sviridov readings : collection of articles*. Vol. 13. Minsk, 2017; 31-40. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/228556> (rus).
107. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Resource-saving fire-retardant and fire-extinguishing composition "complex" for preventing and extinguishing fires in the natural complex. *Alternative sources of raw materials and fuel : collection of scientific papers*. Vol. 3. Minsk, Belarusian Science Publ., 2018; 91-100. (rus).
108. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Usenya V.V., Gordey N.V., Matyukha S.L. Investigation of the physicochemical and fire-preventing properties of synthetic compounds in relation to wood and peat. *Problems of forestry and forestry : collection of scientific papers*. Vol. 746. Gomel, FI NAS Belarus, 2016; 491-501. (rus).
109. Usenya V.V., Gordey N.V., Markevich T.S., Teglenkov E.A. Silvicultural and ecological aspects of the use of the chemical composition "Kompleksil" for fighting fires in the natural complex of the Republic of Belarus. *Problems of forestry and forestry : collection of scientific papers*. Vol. 76. Gomel, FI NAS Belarus, 2016; 543-552. (rus).

Поступила 21.09.2020, после доработки 15.10.2020; принята к публикации 28.10.2020  
Received September 21, 2020; Received in revised form October 15, 2020; Accepted October 28, 2020

### Информация об авторах

**БОГДАНОВА Валентина Владимировна**, д-р хим. наук, профессор, заведующая лабораторией огнетушащих материалов, Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», г. Минск, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 528477; Scopus Author ID: 7005614283; ORCID: 0000-0002-8557-9925; e-mail: bogdanova@bsu.by

**КОБЕЦ Ольга Игоревна**, канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории огнетушащих материалов, Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», г. Минск, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 1043455; ORCID: 0000-0002-6702-7430; e-mail: kobets@bsu.by

### Information about the authors

**Valentina V. BOGDANOVA**, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of Extinguishing Materials Laboratory, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus; ID RISC: 528477; Scopus Author ID: 7005614283; ORCID: 0000-0002-8557-9925; e-mail: bogdanova@bsu.by

**Olga I. KOBETS**, Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Extinguishing Materials Laboratory, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus; ID RISC: 1043455; ORCID: 0000-0002-6702-7430; e-mail: kobets@bsu.by